



J. Endo

智能化技術 20 年の歩み

神奈川工科大学 教授
遠藤 順一

1. はじめに

著者は本誌 (FORM TECH REVIEW)12 巻の巻頭言において次のように述べた。

「1946 年 (昭和 21 年) に産声を上げたと言われているデジタルコンピュータが、今日、これほどの巨人に成長しようとは、開発した当事者達も予想できなかったのではなかろうか。社会全体に与えてきた、そして与えるであろう影響の大きさは計りしれないものがある。

コンピュータが「生産」に及ぼした影響を見てみると、加工への応用として 1952 年に NC 工作機械が発表され、1958 年にはマシニングセンターが出現している。我国の工作機械メーカーはいち早く NC 化に取り組み、世界一の生産国となることができた。加工機械の NC 化は「技能」の「技術化」、すなわち「暗黙知」の「形式知」化を意味している。NC 化以前には、熟練工でなければできなかった曲面を NC 加工機は楽々作り上げる。」

この状況は今日でも全く変わっていない。工作機械は 25 年間世界一の生産と輸出を誇っている。さらに、プレス機械の駆動源にサーボモータを使ったサーボプレスが普及し始め、工作機械に遅れを取ってきたプレス機械もサーボ化、NC 化が進もうとしている。

このようにコンピュータと IT 技術の進歩が生産科学、塑性加工の分野にも多大な影響を及ぼしており、本財団の研究助成テーマにも関連している研究開発が少なくない。本誌 2 巻の巻頭言に故宮川松男教授 (当時本財団理事、選考委員会委員長) は「塑性加工のインテリジェント化はどこまで進むか」と題され、「塑性加工のインテリジェント化について今後一層の進展を期待したい。」と述べられている。本報は本財団が助成してきた研究開発課題の成果を中心に、20 年間の智能化の歩みを述べてみたい。

2. 智能化 (インテリジェント化) 技術とは何か。

智能化という場合にその中身を吟味しておく必要がある。まず、機械そのものの智能化がある。NC 機械が智能化された機械であるとは言いがたい。著者は智能化機械の概念を図 1a,b に表した。即ち、人間は、作業 (あるいは労働) の実

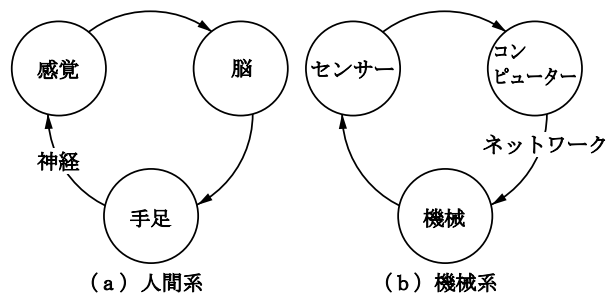


図 1 智能化機械の概念

行部位である手足とアクチュエーターとしての筋肉があり、手足・筋肉に作業の指令あるいは制御を行う脳、手足の動きを監視し、フィードバックをかけるセンサーとしての五感、それらを結ぶ神経がある。この人間における機能の分担と協調の関係を智能化機械にあてはめたものが図 1b である。手足と筋肉の代わりが機械であり、脳はコンピュータ、五感はセンサー、神経はネットワークで置き換えられている。ここで脳の働きは認識、判断、意思決定、制御、学習などである。NC 工作機械におけるコンピュータは制御と多少の認識と判断で、意思決定や学習は行われていない。指令も外部からのプログラムによる。従って、智能化機械とはセンサーからの情報を基に、少なくとも認識や判断の機能を有する機械であるべきであろう。学習機能があるとすればさらに望ましいと思われる。

加工においては、設計は極めて重要な因子となる。悪い設計では材料や加工時間に無駄が生じる。熟練した設計者のノウハウを CAD/CAM に取り込むことが必要で、いわゆるエキスパートシステムやそれらを支えるデータベース構築も重要な智能化技術の一つである。プレス成形加工や鍛造においては工程設計も重要であり、これらに智能化技術を適用することが試みられている。また、多品種少量生産においては機械やシステムの運用が重要であり、スケジューリングや MRP (Material Resource Planning) に智能化技術を取り入れることも必要である。即ち、これらの周辺技術において、コンピュータを利用し、エキスパートシステム、データベースや学習等で最適化を図ることが求められている。特に、いわゆる 2007 年問題で、熟練した人材 = エキスパートがいなくなり、これらの人材の持っていたノウハウをいかに継承し、コンピュータに取り入れるかが大きな課題となっている。

3. 智能化機械の開発例

3.1 智能化曲げ加工機械の事例

図 2 は島・楊らが開発した智能化曲げ加工機¹⁾である。曲

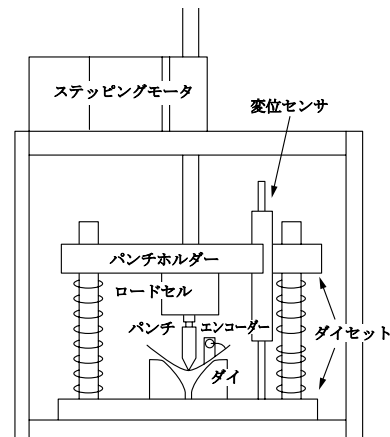


図 2 智能化曲げ加工機

げ加工中の荷重、ストローク、曲げ角度を測定し、材料特性値を同定して、所望の曲げ角度を得るためのストロークを自ら決定できる。材料特性値の同定には、簡単な曲げ加工の理論解析を使用している。そこで、計算を楽にするために、被加工材が常に3点曲げとなるような金型を用いている。

早乙女・小山らは同様の構成からなる知能化曲げ加工機²⁾を開発しているが、材料特性の同定に荷重ストローク曲線のデータベースを用いている。特に、データベースと機械の所在地を変え、両者をネットワーク（公衆電話回線）で結び、テレ・オペレーティングを試みている。このシステムを図3に示す。このシステムを用いれば、本社のコンピュータにデータベースをおき、地方の工場において、ネットワークによりこのデータベースを利用することが可能になる。

多くの材料の荷重～ストローク曲線のデータベースを構築するためには多大な労力（実験）を必要とする。楊・真鍋ら^{3), 4)}は計算では材料特性を変えることは容易であることを利用し、FEMを用いて材料のデータベースを構築し、実曲げ加工の荷重～ストローク曲線において、データベースを参照してもっとも近いものを選び、ファジー制御を用いて曲げ加工を行うシステムを開発した。このシステムを図4に示す。曲げ金型も実用

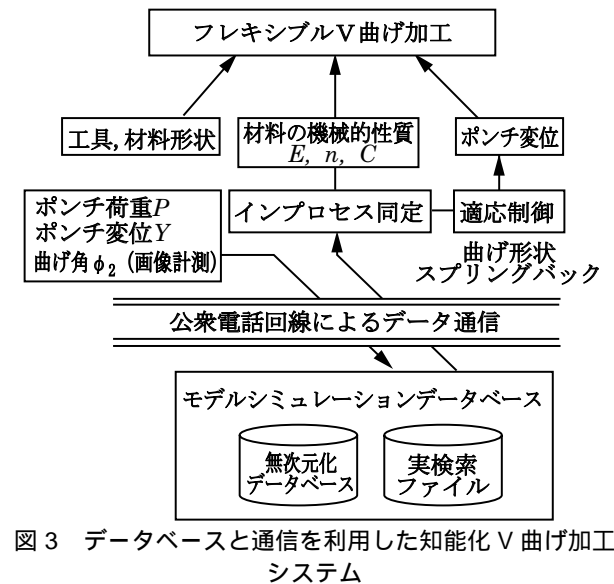


図3 データベースと通信を利用した知能化V曲げ加工システム

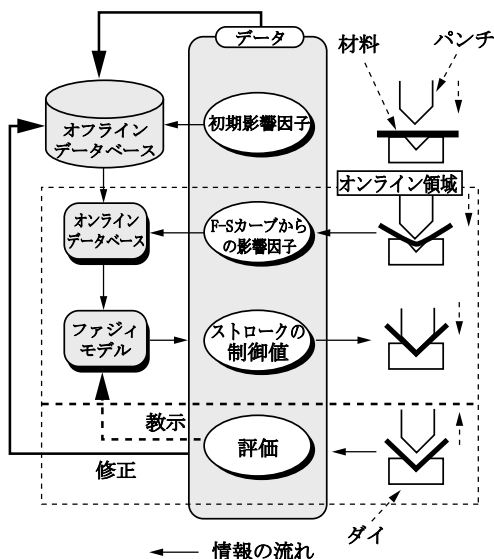


図4 データベース利用知能化曲げ加工の概念

のV曲げ用の金型を利用し、目標角度に対し $\pm 15^\circ$ までの精度を得ている。これらの研究開発の多くが、本財団の助成の成果である。残念ながら、市販に到った機械はまだない。

小川⁵⁾はプレスブレーキの曲げ加工において、曲げ加工中の特定段階の曲げ荷重あるいは曲げ角度からスプリングバック角が零となる工程を予測するアルゴリズムを求めた。

1987年に小型プレスブレーキの駆動にサーボモータを使用したものが市販された。これをもって今日のサーボプレスの嚆矢とする。モータトルクを用い、繰り返し精度を向上させている。油圧式プレスブレーキにおいて、繰り返し精度や通り精度を向上させる試みが企業においてなされている。

3.2 知能化深絞り加工機の事例

真鍋は円筒深絞りにおいて、荷重、ストローク、フランジ変位、しわ押さえ力と変位等を測定し、加工初期のデータから材料特性を同定し、しわ押さえ力を最適に制御する知能化深絞り加工機⁶⁾を開発した。図5に加工機の詳細を示す。このシステムはその後アルミニウム合金に対して成形加工データベースを構築し、AI(Artificial Intelligence) 制御を取り入れた。鉄鋼系材料に対しても成形加工データベースを構築することができれば、このシステムを利用することは可能な筈である。図6にこのシステム^{7), 8)}を示す。さらにブランクホ

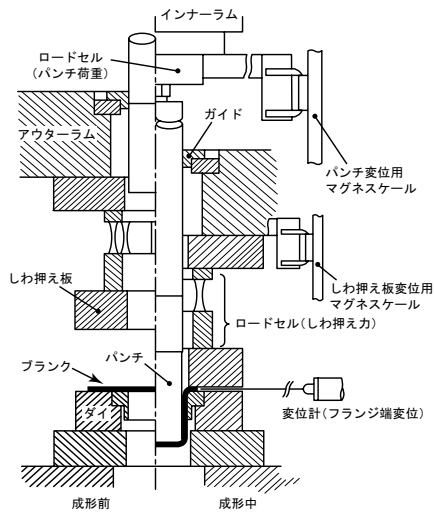


図5 知能化深絞り加工機

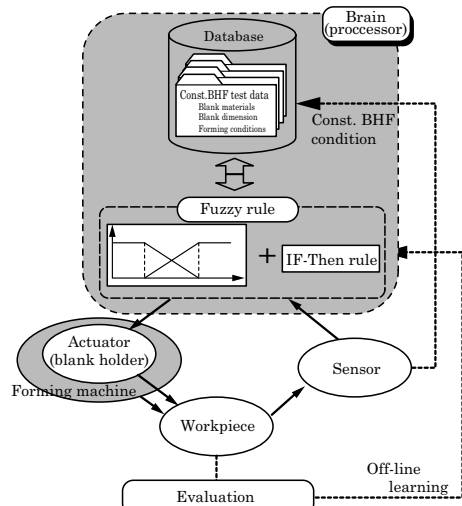


図6 データベースを用いたプレス成形用知能化制御システムの概念

ルダ一部に極低周波振動を重畳し、摩擦低減効果を付与し、極低周波振動付加ファジィ適応制御円筒深絞り加工により、セミドライ、ドライ加工の可能性を見出した。

以上の例ではしわ押さえ力を制御しているが、一般にはビードをつけてフランジ部の材料流れを制御することが多い。桑原はビードの張力を制御する知能化金型⁹⁾の研究を行い、楯列はビード制御プレス機械¹⁰⁾の開発を行っているが、両者はほぼ同じと考えてもよい。図7に桑原によるL字型容器成形用のポンチとしわ押さえ板を示す。

これらの研究はいずれも本財団の助成を受けている。

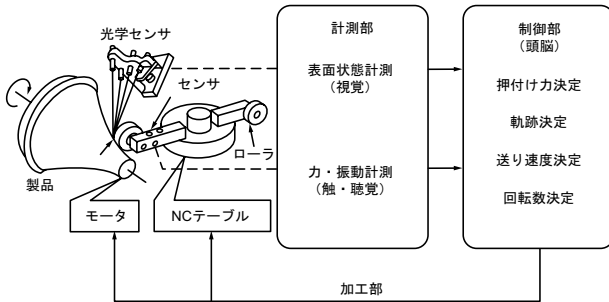


図7 知能化スピニング加工機

3.3 スピニング加工、インクリメンタルフォーミング、自由鍛造等の知能化、その他。

素材に局部的に塑性変形を与え、所望の形状を得る方法は槌起等に見られるように、最も古い塑性加工法である。これらの加工法が、多品種少量生産に適した塑性加工法として見直されている。しかし、これらの加工法は経験や勘に頼ってきたので、経験や勘を形式知化する必要がある。そのような知能化技術開発の取り組みが多くなされている。

川井¹¹⁾は図7に示す知能化されたスピニング加工機に対する加工事例ファクト・データベース、トラブル対策データベースを構築した。このデータベースの構築には、学会の分科会で収集した加工事例を元にしており、スピニングにおける最適パススケジュールの選定、加工時のトラブル対策と製品品質向上対策に用いることができる。

島は金型を用いない、フレキシブルスピニング加工法¹²⁾を提案した。また、村田は管材の縮管成形を対象としたCNCスピニング加工機¹³⁾を開発している。また、川井¹⁴⁾はダイレスしごきスピニングを提案している。

インクリメンタルフォーミングに関する研究も活発である。松原^{15), 16)}は板成形の加工システムを管の成形に使い、北沢は手指機能模倣CNC塑性加工機¹⁷⁾を開発している。さらに工具の成形パスを推論するニューラルネットワーク¹⁸⁾を構築している。大津¹⁹⁾はレーザーフォーミングにおいて、データベースを基に加工工程を制御した。

自由鍛造については、田中²⁰⁾はコンピュータ制御逐次プレス成形装置を用い、ニューラルネットワークを用いた学習による加工プロセス最適化と制御、論理型プログラミングによる学習システムの構成と獲得知識を利用した工程設計を検討している。白石²¹⁾はタービンブレードの自由鍛造のためのコンピュータ制御翼形成形システムを試作している。

楊²²⁾はチューブハイドロフォーミングに対し、ファジー制御を適用した知的センシング・制御システムを開発している。

塑性加工機械に用いられるサーボモータによる位置決め制御²³⁾あるいはタレットパンチプレスの位置決め制御²⁴⁾の開発も行われている。これらの制御法は新しい制御理論を適用している。

4. 設計等関連業務の知能化技術

金型を用いた塑性加工においては、一度には加工しきれないことも多く、工程を分ける必要がある。工程の分け方には経験など暗黙知が必要なことがあり、これを知能化技術で代替しようとする試みがなされている。

小坂田らは鍛造の工程設計のエキスパートシステム²⁵⁾を構築した。このシステムでは工程の推定には、実際の工程データを基に、加工前後の変形パターンを抽出し、基本工程データベースとしている。工程の推定にはニューラルネットワークを用い、工程の評価には剛塑性FEMを用いている。システム構成を図8に示す。小坂田らのシステムは軸対称部品を対象としているが、本村らは熱間、冷間のいずれにも対応でき、かつ軸対称以外の形状にも対応可能な事例ベース型推論鍛造工程設計システム²⁶⁾を開発した。工具寿命予測にはファジー言語演算を用いている。

一方、板成形に対しては、乾ら^{27), 28)}は曲げ順送加工の工程設計を取上げ、さらに板金成形品の展開図の生成アルゴリズムを求めた。青村ら^{29), 30), 31)}は板金曲げ加工を対象とし、ロボットによる板金曲げ加工工程設計の自動化・最適化を行い、曲げ順序を決定し、ロボットの把持位置を推定するシステムを開発した。また、突き当て計測誤差最小を考慮した最適板金曲げ加工工程設計システムを開発し、結果を工程設計者によるものと比較し、有効性を確かめた。さらに、板金図面から展開製品形状の自動作成システムを開発している。細貝³²⁾らは、板金曲げ加工用ロボットが、薄板を把持した際に生じる板のたわみを間接的にセンシングし、ハンドリング制御を行う手法をシミュレーションにより示した。

早瀬ら³³⁾はFMSの加工順序の最適化の多目的スケジュールの解法を提案し、吉村³⁴⁾はコンカレントエンジニアリングにおける設計での意思決定について論じている。また、遠山³⁵⁾は曲げ加工ロボットのシミュレーションを行い複数のロボットの自律分散システムを論じている。大松³⁶⁾はニューラルネットワークに遺伝的アルゴリズムを組合せ、塑性加工に適した加熱炉の温度制御法を開発した。

知能化技術においてはデータベースの作成が重要であるが、特に、加工事例データベース等は個人で作成すること

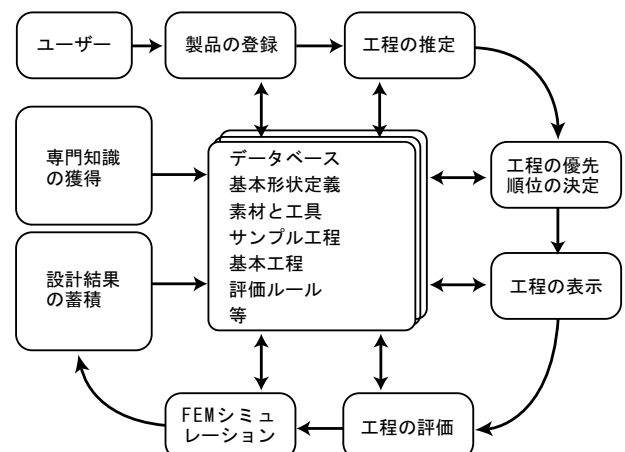


図8 冷間鍛造工程設計エキスパートシステム

が難しい．そこで学会レベルでの仕事となる．日本塑性加工学会による「塑性と加工」文献データベース³⁷⁾，同学会プロセス・トライボロジー分科会によるプロセス・トライボロジーに関するデータベース³⁸⁾，軽金属学会におけるアルミニウム押出成形材の曲げ加工データベース³⁹⁾，超塑性加工研究会による超塑性データベース⁴⁰⁾，機械技術協会による塑性加工品の限界精度に関する調査研究⁴¹⁾，塑性加工におけるCIM/IMS化とヒューマンファクターに関する調査研究⁴²⁾，日本塑性加工学会南関東支部における板金CADデータ標準化に関する研究⁴³⁾などがある．

5. おわりに

塑性加工における知能化技術の20年にわたる歩みを，本財団の助成成果から述べてみた．改めて，知能化技術について，本財団の助成が果たした役割の大きさに驚く．これは他の分野でも同じであろう．知能化にかんしては，財団の初期の助成に多くのテーマがみられるが，最近では少なくなっていることも特徴の一つとしてあげられる．また，知能化・システム化について，塑性加工のなかではもっとも先端的であろうと考えられる，圧延機・システムに関する助成課題が全く無い．これは圧延機・システムがあまりに巨大・巨額で，大学等に所属する研究者の手に負えなくなっていることではないかと推測している．

FEMは発表されてから，実用化に到るまで，約10年を要したといわれている．知能化技術も実用化に達しているものはないではないが，極めて少ない．今後は実用化に向けた開発も必要であろう．そのためには，研究開発の成果を普及啓発する努力が必要である．さらに，研究者自身も，研究論文を出して終わりにするのではなく，研究の実用化に向けた努力が必要で，研究の成果を基にした新しいビジネスモデルの提案を行うべきである．本財団においても，研究成果の実用化に対する助成が必要となるかもしれない．

なお，本報告では，財団の発行している「フォーム テック レビュー」を中心にし，各年度の研究概要報告書から関連するテーマを抽出した．必ずしも知能化技術に到っていないものも取上げているが，そのテーマの発展系として知能化にならない筈がないという著者の独断によるもので，読者のご了承をえたい．

参考文献

- 1) 島進，楊明：FORM TECH REVIEW, 2-1, (1992), 63-72.
- 2) 早乙女康典，小山秀夫：日本塑性加工学会塑性加工の知能化研究委員会, No. 10-1, (1993)
- 3) 楊明，真鍋健一：FORM TECH REVIEW, 7-1, (1997), 12-16
- 4) 真鍋健一，楊明：同上, 12-1, (2002), 73-78.
- 5) 小川秀夫：(天田財団) 研究概要報告書, 19, (2007), 58-62.
- 6) 真鍋健一：FORM TECH REVIEW, 1-1, (1991), 8-16.
- 7) 真鍋健一，吉原正一郎，楊明：FORM TECH REVIEW, 7-1, (1997), 17-22
- 8) 真鍋健一：(天田財団) 研究概要報告書, 19, (2007), 20-24.
- 9) 桑原利彦：FORM TECH REVIEW, 7-1, (1997), 23-28.
- 10) 楯列俊夫：同上, 29-33.
- 11) 川井謙一：FORM TECH REVIEW, 2-1, (1992), 44-55.
- 12) 島進：(天田財団) 研究概要報告書, 15, (2003), 53-58.
- 13) 村田眞：(天田財団) 研究概要報告書, 12, (2000), 40-44.
- 14) 川井謙一：(天田財団) 研究概要報告書, 13, (2001), 112-115.
- 15) 松原茂夫：(天田財団) 研究概要報告書, 2, (1990), 16-19.
- 16) 松原茂夫：FORM TECH REVIEW, 2-1, (1992), 83-89
- 17) 北澤君義：同上, 7-1, (1997), 34-37.
- 18) 北澤君義，守国栄時：50回塑性加工連合講演会論文集, (1999), 1-2.
- 19) 大津雅亮：FORM TECH REVIEW, 7-1, (1997), 23-28. 14, (2002), 180-184.
- 20) 田中繁一：FORM TECH REVIEW, 7-1, (1997), 38-44.
- 21) 白石光信：同上, 43-48.
- 22) 楊明：(天田財団) 研究概要報告書, 16, (2004), 188-193.
- 23) 藤本博志：(天田財団) 研究概要報告書, 17, (2005), 22-27.
- 24) 野波健蔵：同上, 17, (2005), 32-35.
- 25) 小坂田宏造，楊国彬：FORM TECH REVIEW, 2-1, (1992), 37-43
- 26) 本村貢：(天田財団) 研究概要報告書, 10, (1998), 6-8.
- 27) 乾正知：(天田財団) 研究概要報告書, 13, (2001), 142-146.
- 28) 乾正知：(天田財団) 研究概要報告書, 11, (1999), 154-158.
- 29) 青村茂：FORM TECH REVIEW, 12-1, (2002), 48-51,
- 30) 青村茂：同上, 13-1, (2003), 26-31.
- 31) 青村茂：(天田財団) 研究概要報告書, 12, (2000), 103-108.
- 32) 細貝英美，福田敏男：(天田財団) 研究概要報告書, 6, (1995), 22-29.
- 33) 早瀬実，野中慎一，森慎吾：FORM TECH REVIEW, 1-1, (1991), 55-62.
- 34) 吉村充孝：同上, 2-1, (1992), 24-36.
- 35) 遠山茂樹：(天田財団) 研究概要報告書, 11, (1999), 49-52.
- 36) 大松繁：同上, 11, (1999), 70-74.
- 37) 柳本左門：同上, 8, (1996), 7-9.
- 38) 中村保：同上, 13, (2001), 33-41.
- 39) 坂木修次：同上, 9, (1997), 29-35.
- 40) 川原正信：同上, 10, (1998), 91-94.
- 41) 木内学 他5名：FORM TECH REVIEW, 1-1, (1991), 34-54.
- 42) 木内学 他5名：同上, 7-1, (1997), 49-54.
- 43) 西村尚：(天田財団) 研究概要報告書, 16, (2004), 160-166.