

---

# 冷間鍛造工程のエキスパートシステム

小坂田 宏造\* 楊 国彬\*\*

## 1. 緒言

人工知能 (AI) 研究の一環として1960年代の中頃から始められたエキスパートシステムの開発は、1980年代になって各種の分野でかなりの成功を収めてきた。エキスパートシステムは従来のデータ処理に AI 技法を適用したものと見ることができ、人間が行っている情報処理のいくつかの側面をできる限り機械化しようという絶え間ない試みの結果生まれてきたものである。

1970年代初期に熱間鍛造の工程設計や型設計への計算機の応用研究<sup>1)</sup>が発表されて以来、冷間鍛造分野においても多くの研究者がこの研究に取り込んできた。冷間鍛造においては、工程設計用エキスパートシステムの研究が1980年代の後半に一種のブームとなり、冷間鍛造製品の形状を表現するプロダクトモデルや工程推定方法がほぼ定型されたが、製品や工具の欠陥予測、工具寿命、コスト評価などの知識ベースを構築する難しさなどのことから、期待されたほどの効果を発揮するには至っていない。

本稿では、筆者らが開発してきた冷間鍛造工程設計用エキスパートシステムを紹介しながら、冷間鍛造工程設計のエキスパートシステムに関する研究の歴史、現状、及び、今後の動向について解説する。

## 2. 従来の研究と現状

冷間鍛造製品の工程設計にコンピュータを応用した最初の研究発表は1970年代初期にさかのぼる。

Noack<sup>2),3)</sup>は1973年に形状類似の軸対称冷間鍛造製品の工程設計、及び、コスト評価のための二つのコンピュータプログラムを発表し、Lengyel<sup>4)</sup>はコンピュータを利用して、複数の冷間鍛造工程候補から最適なものを選び出す方法を1977年に提案した。以来、数多くの研究が発表されている。Rebholz<sup>5),6)</sup>は Noack<sup>2)</sup>の研究を発展させ、Gokler<sup>ら7),8)</sup>はグループテクノロジー<sup>9)</sup>やプロダクションルールを応用し、鍛造製品の工程設計を行う初歩的な研究を開始した。その後、同じ方法を冷間鍛造製品の工程設計に適用する試みが Davison<sup>ら10)</sup>によって行われた。

1980年代中頃、Badawy<sup>ら11)</sup>は簡単な軸類の冷間鍛造製品をコンピュータに認識させ、工程設計を行うコンピュータ支援システム FORMNG を開発した。その後、Sevenler<sup>ら12)</sup>は人工知能技術を導入し、Badawy<sup>ら</sup>の研究を発展させ、据込みと前方押し出し加工の工程設計を考慮したエキスパートシステム FORMEX を発表した。このシステムが現在更に改良され、CAD やシュミレーションを統合した冷間鍛造工程設計システム<sup>13)</sup>の一部として用いられている。

一方、Bariani<sup>ら14)-17)</sup>は Davison<sup>ら10)</sup>の研究を基に、「工程生成、評価と修正」を基本方針として、冷間鍛造工程設計エキスパートシステムの開発を行ってきた。このシステムの主な機能として、工程の推定、工程の評価、コストの計算、工具や多段加工時のプレス タイミング の設計などが挙げられている。

Lange<sup>ら18)</sup>は「成形前の製品形状が成形後の

形状より単純である。」という“Simplification principle”に基づき、基本変形パターンを用いて工程を作り出す方法を提案しているが、特に据込み加工においてこの原則に従わない例外が多いことから、適用範囲が疑われる。Dannoら<sup>19)</sup>は冷間鍛造加工における製品形状変換知識をデータベース化し、工程設計エキスパートシステムFOREST-Dを開発した。基本形状変化パターンを適用して、工程を新しく作り出し、場合によって膨大な数の工程候補が得られるため、得られた工程候補の中から加工可能な工程を選び出すのに工夫されている。また、Lengyelら<sup>20), 21)</sup>は従来の研究を継続し、特に中空の冷間鍛造製品の工程設計エキスパートシステムの開発に力をいれている。その他、パーソナルコンピュータ上で稼動するシステムの開発がAzushimaら<sup>22)</sup>によって試みられている。

最近、剛塑性有限要素法(FEM)シミュレーション自体の計算精度の向上やエンジニアリングワークステーション(EWS)の普及などから、剛塑性FEMシミュレーションは十分に実際の加工状態をシミュレートできるようになった。これに伴い、エキスパートシステムとFEMシミュレーションを統合する研究がHartleyら<sup>23)-26)</sup>、Sevenlerら<sup>13)</sup>、Albertiら<sup>27)</sup>等によって報告された。主には、シミュレーションを利用して鍛造加工における金属流れを予測し、工程評価を行うものである。また、工程設計、ダイ設計、CAD、シミュレーションなどのすべてのソフトウェアを一つのシステムに統合し、冷間鍛造工程設計パッケージを開発する試みも行われている<sup>28)</sup>。

### 3. 工程設計エキスパートシステムの構成

ここで、筆者等<sup>29)-33)</sup>が開発した冷間鍛造工程設計エキスパートシステム(図1)を例として、鍛造エキスパートシステムの構成について述べる。このシステムは基本形状定義データ、サンプル工程と基本工程データ、材料データ、工具データ、工程評価知識ベースなどからなるシステムのデータベースと、これに基づく製品の登録、工程の推定、工程の優先順位の決定、工程の評価、ユーザ

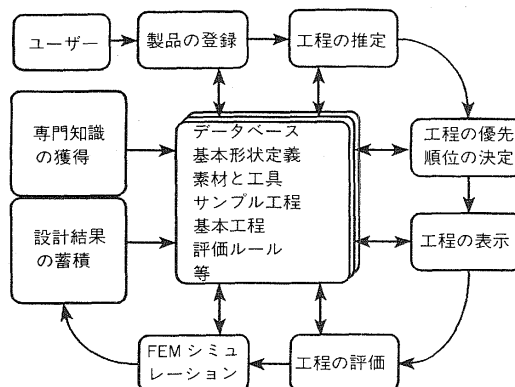


図1 工程設計エキスパートシステムの構成<sup>30)</sup>

インターフェースによる工程の編集や剛塑性FEMシミュレーションによる工程の検証等の主な機能からなる。

#### 3.1 プロダクトモデル

冷間鍛造で加工される製品の大部分は軸対称のものであるため、現在軸対称製品に対する工程設計エキスパートシステムの開発しか行われていない。コンピュータに冷間鍛造製品を認識させるため、製品形状を記述する幾何学的なプロダクトモデルが必要である。

代表的なプロダクトモデルには、Goklerら<sup>7), 8)</sup>が提案したグループテクノロジーに基づく製品形状表現法がある。この方法は材料特性と製品の基本形状、付属物形状、及び、複雑さを示す四桁のコードを利用して製品を分類し表現するものである。Davisonら<sup>10)</sup>、Barianiら<sup>14)-17)</sup>とHartleyら<sup>24)</sup>の研究にもこの方法を採用している。その他にもいくつかの方法<sup>12), 18)</sup>が用いられている。

筆者らは図2に示すようなプロダクトモデルで軸対称の製品形状を表す方法を提案している<sup>29), 33)</sup>。この方法では、冷間鍛造の形状特徴から製品が各構成部に分けられ、円柱、円錐台などの基本形状をもって、リスト形式で製品の形状と寸法が表現される。

#### 3.2 工程推定

工程推定には、色々な方法が提案され、用いられているが、基本的には、冷間鍛造加工過程での製品の幾何学的な形状変化特徴に基づいて工程推定が行われている。Goklerら<sup>8)</sup>やAzushima

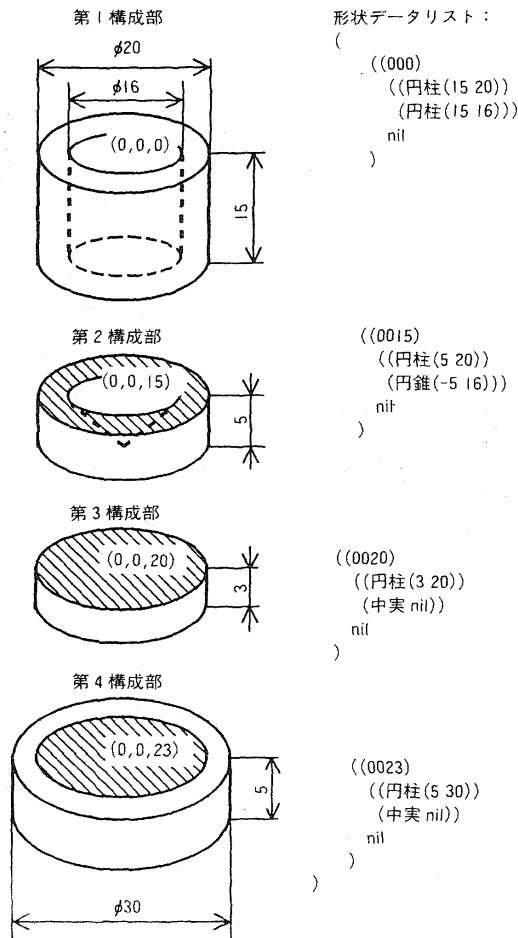


図2 プロダクトモデルによる製品形状記述<sup>33)</sup>

ら<sup>22)</sup>は各種加工に対応する変形ルールを適用して、選ばれた素材から工程を直接作り出す方法を用いている。Davisonら<sup>10)</sup>とBarianiら<sup>8),9)</sup>はグループテクノロジーを利用し、各グループに対応する変形ルールを組み合わせ適用し、工程を推定する方法を提案している。Langeら<sup>18)</sup>とDannoら<sup>19)</sup>は製品の幾何学的な基本形状変化パターンを用い、新しい工程を作り出す方法を提案している。また、Badawyら<sup>11)</sup>とSevenlerら<sup>12)</sup>は簡単な軸類製品の工程推定について試みている。

工程推定を実現するために、筆者ら<sup>30)</sup>は専門家に実際の工程データを提供して頂き、まず簡単なサンプル工程データベースを作成した。サンプル製品が加工前と加工後とで、実際の形状変化の基本パターンが存在する特徴より、各サンプル工程

から、基本的な変形パターンを抽出し、得られた基本変形パターンからなる基本工程データベースを作成した。

与えられた製品の工程推定には、サンプル工程データベースに同じ様な製品が存在する場合、その製品の工程を与えられた製品に適用するパターン認識法、また、与えられた製品と同じ様な製品がサンプル工程データベースに存在しない場合、基本工程データベースにある基本変形パターンを利用して新たな工程を作り出す方法を提案している<sup>30)</sup>。この方法では、与えられた製品の各構成部をデータベース中の各製品との比較を行うため、製品が複雑になり、または、工程データベースの情報量が増えると共に、工程推定に必要な時間が長くなる欠点が存在する。

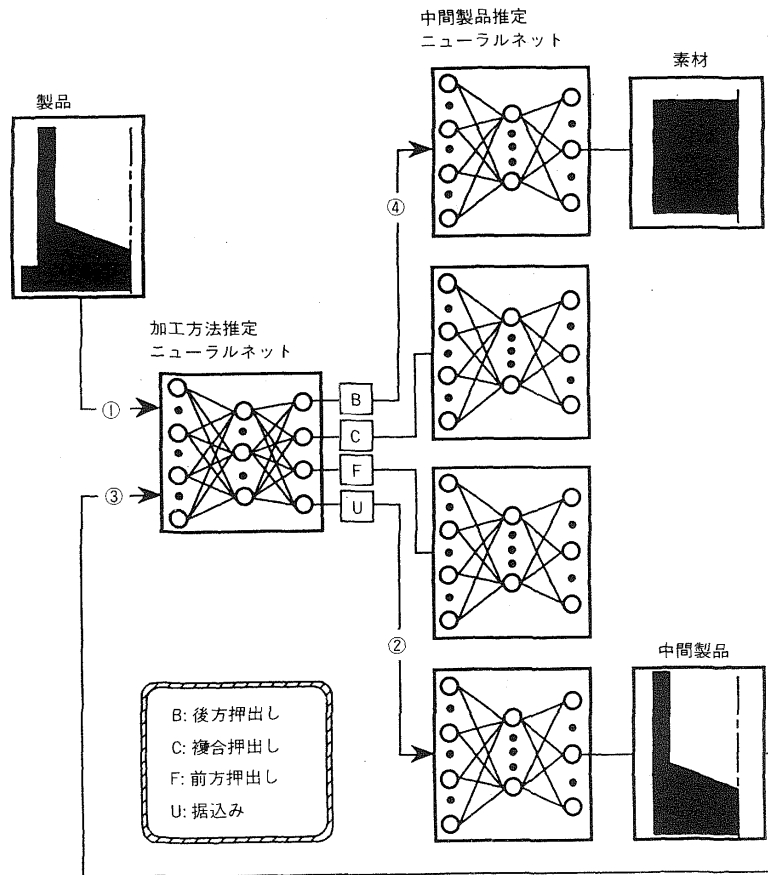


図3 工程推定ニューラルネットワークシステム<sup>32)</sup>

ところが、最近、情報処理分野において、ニューラルネットワークなどの研究が素晴らしい発展を遂げている。ニューラルネットワークが並列分散処理機能、学習機能や自己組織機能を持ち、パターン認識に適している。そこで、サンプル工程をニューラルネットワークに学習させ、工程推定ニューラルネットワークを作成した(図3)。このように作成したニューラルネットワークを利用して、工程推定が瞬時に行うことができる。また、ニューラルネットワークの学習機能を利用して、サンプル製品と完全に一致しない類似製品についても、ある程度の工程推定が実現でき、より人間に近い工程設計が行うことが可能である。ただし、学習していない製品については、全く考えられぬ結果が得られる場合もある。

### 3.3 工程の優先順位の決定

工程推定の結果、複数の工程が得られる場合が多い。最適な工程を探し出すため、各工程を評価する必要があるが、評価時間を短縮するため、工程評価の優先順位を簡単な方法で決定する。これに関する研究が余り行われていないが、筆者ら<sup>30),33)</sup>は製品の形状複雑さ、材料の変形抵抗や工具の圧縮強さ等を考慮して、統計学的手法<sup>30)</sup>とニューラルネットワークによる方法<sup>33)</sup>で各工程の優先順位を決める試みを行っている。図4に工程の優先順位を決定するニューラルネットワークの構成を示す。各出力ユニットの出力値が対応する工程数を有する加工工程の優先度を示す。

### 3.4 工程の評価

最適な工程を見つけ出すため、得られた各工程を優先順で実際の工程ルールを適用し評価する。Barianiら<sup>15)</sup>は荷重、変形中の相当ひずみなどを

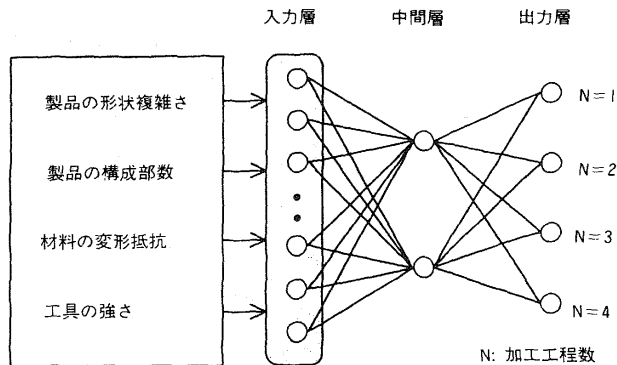


図4 最適加工程数に基づく優先度の決定<sup>33)</sup>

計算して工程評価を行っている。Sevenler ら<sup>13)</sup> は加工率やダイ角度、荷重、プレス仕様などを考慮した工程評価方法を提案している。筆者らは工程評価を行うため、一種の工程評価システムを作成した(図5)。工程評価が基本的に専門家から得られた知識に基づくルールベース<sup>29)</sup>を用いるが、実際の知識の獲得が非常に困難なため、FEMシミュレーションの結果から知識を獲得し、これらを多変量解析法やニューラルネットワークの学習機能を用いてルール化し、システムのルールベースの不足を補う方法を提案している<sup>31), 33)</sup>。図6は作成した工具能力を予測するシステムの構成を示す。

また、加工工程が実際に加工できるかどうかを判断するために、試し打ちを行うかわりに、剛塑性FEMシミュレータRIPLS-FORGE<sup>34)</sup>を用いてシミュレーションを行い、実際の変形過程での金属の流れや欠陥発生の有無などを最終的に検証し、現実に即した製品の成形段階での問題点を把握し、工程を更に改良していく方法を採用している。

### 3.5 ユーザーインターフェース

現在、工程設計を完全に自動化するような冷間鍛造工程設計用エキスパートシステムを開発するより、専門家を支援するようなシステムの開発は現実的であると考えられている。このため、システムではユーザーインターフェースが非常に重要な役割を担うことになる。特にグラフィックス機能を通じて製品や素材の形状などをユーザーに提

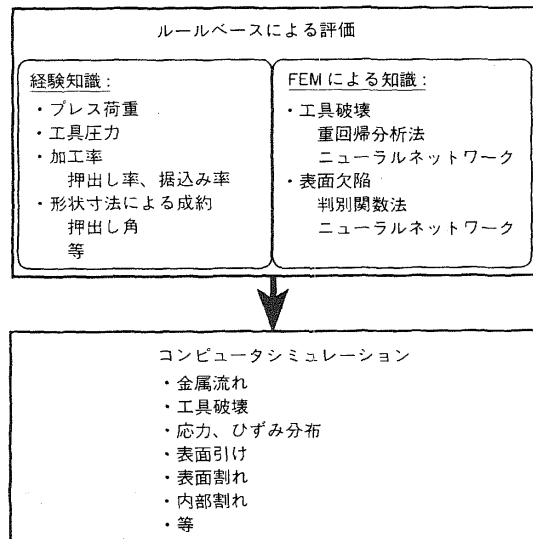


図5 工程評価システムの構成

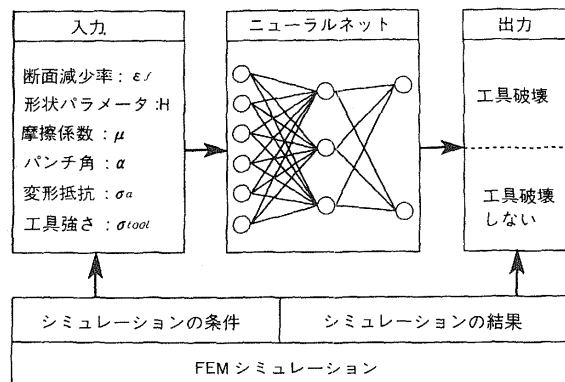


図6 工具能力予測ニューラルネットワーク

示したり、編集したりするには、市販のCADソフトを利用するのが多いが、ユーザーインターフェースで工程に関する簡単な編集ができるように、筆者らが自作した簡単な2次元と3次元CADプログラム<sup>29)</sup>を用いている。

#### 4. 今後の課題

以上述べたように、冷間鍛造工程設計用システムの開発が活発に行われているが、現段階では、いずれもプロトタイプ的なものにすぎない。システムを完成させていくために次のような課題等が残されている。

(a) 知識の獲得 知識ベースの情報量により、エキスパートシステムの能力が左右される。現場での経験知識をきちんと整理して応用することも重要であるが、人間の知識には限界があり、シミュレーションの結果から知識を獲得する方法などの研究を推進する必要がある。

(b) 学習機能 知識の更新や新しい製品の工程推定や工程評価に対応できるように、システムの学習機能や柔軟性が要求される。このため、ニューラルネットワーク<sup>32), 33)</sup>やファジィ推論<sup>35), 36)</sup>を利用した試みを筆者らは行っているが、これに関して更に多くの研究を積み重ねる必要がある。

(c) 製品欠陥の予測 新たな工程を評価するとき、製品の表面欠陥や内部欠陥を予測するのに、過去の事例からの製品欠陥に関するデータを蓄積し、作成したデータベースを用いて欠陥予測を行う方法などが考えられるが、大量のデータを獲得し、データベースにする難しさなどから、多くの努力が要される。

(d) 工具の設計 具体的な加工工程に用いられる工具の設計は現在単独に行われる場合が多いが、工具の設計も工程設計システムに統合し、工程設計と工具設計を同時に行い、設計の効率を向上する必要がある。

(e) 工具寿命の予測 工具寿命が加工圧力、加工環境、潤滑や摩擦条件などに影響される。関連因子による影響が複雑なため、工具寿命の正確な予測が難しいが、工具寿命が加工工程の経済性に大きく影響するので、工程を評価するとき、工具

寿命を予測し把握する必要がある。そのための基本データの整備が不可欠である。

(f) コストの計算 設計された工程が技術的な条件を満たしている場合でも、莫大な費用を要するものでは現実的な意味が薄い。コスト計算の実用的な方法を研究し、工程評価の基礎的なルールとして扱う必要がある。

#### 5. 結言

以上、冷間鍛造エキスパートシステムの現状について述べたが、このようなシステムの実用化にはまだ解決すべき問題が多い。剛塑性有限要素法によるシミュレーション方法の開発の経験から考えると、ソフトウェアの可能性が提案されてから、実際に用いられるようになるには10年単位の時間が必要であると思われる。即ち、塑性加工に関連する各種の問題点の解決を行い、利用の事例を積み上げるために、更にかかなりの努力が必要であると見られる。

日本の生産部門では、多品種少量生産、高度精密製品の加工が要求され、全社的なコンピュータ化、国際的な生産拠点の広がりが進行している。塑性加工工程設計については、現在はシミュレーションによる試行錯誤回数の低減が重要な課題になっている。シミュレーションが広範な実用の段階に達し、更に少量生産の傾向が進行すれば、エキスパートシステムへの要求が高まると思われる。それまでに、知識獲得方法の確立、有限要素法などのシミュレーションとエキスパートシステムの結合、ファジィ理論やニューラルネットワークの利用といった各種の努力を行い、実用的なレベルに高める必要があろう。

#### 参考文献

- 1) Akgerman, N. & Altan, A. : SME Technical Paper, MF72-110, (1972).
- 2) Noack, P. : SME Technical Paper, MF73-141, (1973).
- 3) Noack, P. : Proc. ICFG Congr., (1975), 290.
- 4) Lengyel, B. & Venkatasubramanian, T.V. : Proc. 18th MTDR Conf., (1977), 153.

- 5) Rebholz, M. : Ann. CIRP, 29-1 (1980), 173.
- 6) Rebholz, M. : Proc. 7th Int. Congr. Cold-Forging, (1985), 117.
- 7) Gokler, M. I., Knight W. A. & Poli, C. R. : Proc. 9th NAMRC, (1981), 158.
- 8) Gokler, M. I., Dean, T. A. & Knight, W. A. : Proc. 22nd NTDR Conf., (1981), 457.
- 9) Knight, W. A. : Metall. Met. Form., (1971), 245.
- 10) Davison, T. P. & Knight, W. A. : Proc. 1st ICTP, 1, (1984), 551.
- 11) Badawy, A. A., Raghupathi, P. S., Kuhlmann, D. J. & Altan, T. : J. Mech. Work. Technol., 11, (1985), 259.
- 12) Sevenler, K., Raghupathi, P. S. & Altan, T. : J. Mech. Work. Technol., 14, (1987), 121.
- 13) Sevenler, K. & Altan, T. : VDI Berichte 810: Kalt-massiv-Umformung 8. Internationaler Congress, (1990), 209.
- 14) Bariani, P. & Knight, W. A. : Ann. CIRP, 34-1 (1985), 245.
- 15) Bariani, P., Benuzzi, E. & Knight, W. A. : Ann. CIRP, 36-1 (1987), 145.
- 16) Bariani, P. & Knight, W. A. : Ann. CIRP, 37-1 (1988), 243.
- 17) Bariani, P., Berti, G., D'Angelo, L., Marengo, M. & Rossi, A. : Proc. 3rd ICTP, 1, (1990), 7.
- 18) Lange, K. & Du, G. H. : Proc. 17th NAMRC, (1989), 17.
- 19) Danno, A., Nakanishi, K., Takata, O., & Yamazaki, T. : Technical Presentation, 22nd ICFG Plenary Meeting, (1989).
- 20) Lengyel, B. & Tay, M. L. : Proc. 27th MTDR Conf., (1988), 345.
- 21) Lengyel, B. & Mahmood, T. : Proc. 17th NAMRC, (1989), 30.
- 22) Azushima, A. & Kim, M. : Ann. CIRP, 39-1 (1990), 245.
- 23) Hartley, P., Sturgess, C. E. N., Dean, T. A., Rowe, G. W. : J. Mech. Work. Technol., 15, (1987), 1.
- 24) Hartley, P., Sturgess, C. E. N., Dean, T. A., Rowe, G. W. & Eames, A. J. : Expert Systems in Engineering, Edited by Pham, D. T., (1988), 425. IFS Publications, Springer-Verlag.
- 25) Eames, A. J., Dean, T. A., Hartley, P. & Sturgess, C. E. N. : Proc. Int. Conf. Comput. Aided Prod. Eng., (1986), 231.
- 26) Rowe, G. W. : Computer-Aided Eng. J., (1987), 56.
- 27) Alberti, N., Cannizzaro, L. & Micari, F. : Ann. CIRP, 40-1, (1991), 295.
- 28) Shende, V. A., Gopinath, S. & Hattangady, N. V. : Ind. Heat., (1991), 22.
- 29) Osakada, K., Kado, T. & Yang, G.-B. : Ann. CIRP, 37-1 (1988), 239.
- 30) Yang, G.-B. & Osakada, K. : Proc. 3rd ICTP, 1, (1990), 109.
- 31) Osakada, K., Yang, G.-B., Nakamura, T. & Mori, K. : Ann. CIRP, 39-1 (1990), 249.
- 32) Osakada, K. & Yang, G.-B. : Ann. CIRP, 40-1 (1991), 243.
- 33) Osakada, K. & Yang, G.-B. : Int. J. Mach. Tools Manufact., 31-4 (1991), 577.
- 34) Osakada, K. & Mori, K. : Ann. CIRP, 34-1 (1985), 241.
- 35) 楊国彬・小坂田宏造：平3春塑加講論，(1991),29.
- 36) 楊国彬・小坂田宏造・黒沢敏朗：42回塑加連講論，(1991), 551.