

圧延加工時の三次元塑性変形の逆行解析手法 ——圧延加工パススケジュールの適応型設計法に関する研究 I——

Three-Dimensional Backward Tracing Scheme for Rolling Processes
——Research on Automatic Optimum Pass-schedule Design for Rolling Processes I——

柳 本 潤*
Jun YANAGIMOTO

1. 結 言

塑性加工分野における理論解析技術は、“計算機上での数値実験装置”としての重要な役割を担っている。塑性加工プロセスの設計においては、図1に示すように、必要とされる製品の1)形状寸法ならびに2)機械的特性を得るために必要な、a)素材の形状・寸法、b)その機械的特性、c)加工工程、d)加工機械、e)加工工具の選定が要求されるが、この手順は必然的に時間逆行的な性格を有する。筆者らは、薄板材、厚板材、異形材を圧延する際に被圧延材に生じる多様な三次元塑性変形の統一的な解明を可能とする数値圧延機CORMILL (Computational Rolling Mill) Systemを開発し^{1),2)}、さまざまな圧延加工プロセスへの適用を通しその特性に検討を加えてきたが、塑性加工プロセスの設計が上述のごとく時間逆行的な性格を有する以上、本解析システムにおいても、時間逆行解析を直接的に行い得るような機能を保有することが望まれる。

塑性加工プロセスの時間逆行解析技術は、従来おもに鍛造加工の分野で適用が試みられてきたが^{3),4)}、現状ではその適用範囲は限定されており、塑性加工プロセスの設計に積極的に活用されるような状況には至っていない。

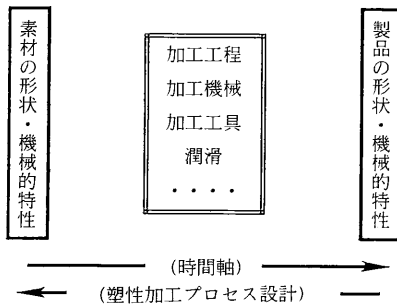


図1 塑性加工プロセスの設計

*東京大学生産技術研究所 第2部

事実、時間逆行解析技術を鍛造加工・圧延加工の三次元解析に適用した例はきわめて少なく、特に有限要素法により三次元逆行解析を行った例は全く報告されていない。加えて、塑性加工プロセス設計への時間逆行解析技術の適用については、否定的な見解も提示されている⁵⁾。

本研究は、上記要求に応え得る、圧延加工プロセスの適応型設計システムの開発を目指すものである。本報では、その第1段階として、板材ならびに異形材圧延を対象とした時間逆行解析 (Direct Synthesis) 手法の基本的な考え方を示す。また、開発した解析手法を数値圧延機 (CORMILL System) に組み込み解析した事例を示すとともに、その特性に検討を加える。

2. 解 析 手 法

本章においては、板材ならびに異形材圧延を対象とした時間逆行解析手法の概要を示す。以後の説明では、幅方向をx軸、厚さ方向をy軸、圧延方向をz軸とする。

2.1 基本的な考え方

定常圧延加工の三次元解析では、入側断面形状 (素材断面形状) を始めとする各種圧延条件が入力変数であり、計算の結果、出側断面形状 (圧延後断面形状) ・変形域各位置での速度・応力・ひずみ分布等が出力変数として得られる。見方を変えれば、このような解析では入側断面形状 (素材断面形状) と出側断面形状 (圧延後断面形状) との対応関係を、連続体力学により求めていることにほかならない。すなわち、入側断面上各位置のx, y方向座標 (基準配置) を (X, Y), 出側断面上各位置のx, y方向座標 (現在配置) を (x, y) と表すことにすれば、これらの座標相互の関数関係を定常三次元順行解析の結果より定めることができる。

本報にて示す逆行解析手法では、順行解析 (通常の三次元解析) により逐時求まる基準配置 (X, Y) と現在配置 (x, y) との関数関係をもとに、圧延後断面の目標形状を得るのに必要な入側断面形状を推定・修正し、繰返し計算によりそれを最適化するといった手順で逆行

解析を行うものとする。具体的な手順を次節に示す。

2.2 解析手法

圧延後断面内各節点<n>の目標座標値を $(\tilde{x}^{<n>}, \tilde{y}^{<n>})$ とする。これを求めるための繰り返し計算の中途段階で求まる入側断面内節点座標の試行値を $(\tilde{X}^{<n>}, \tilde{Y}^{<n>})$ と表す(図2参照)。

CORMILL Systemによる定常三次元順行解析結果をもとに、圧延前後の断面内各位置の変位ベクトル u を次式により定義し、これを現在配置 (x, y) の関数として表す。

$$u(x, y) = \begin{Bmatrix} u_x(x, y) \\ u_y(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x - X(x, y) \\ y - Y(x, y) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ただし、変位ベクトル u は、出側断面上の各節点<n>についての値として離散的に定まるため、式(1)の変位ベクトル u は、出側断面内の各節点 $(x^{<n>}, y^{<n>})$ での変位ベクトルをもとに、双一次パッチ関数により表現するものとする。

式(1)に、圧延後断面内各節点<n>の目標座標値 $(\tilde{x}^{<n>}, \tilde{y}^{<n>})$ を代入し、そのような断面を得るために必要な入側断面内節点座標の試行値を次式により求める。

$$\begin{Bmatrix} \tilde{X}^{<n>} \\ \tilde{Y}^{<n>} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{x}^{<n>} \\ \tilde{y}^{<n>} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} u_x(\tilde{x}^{<n>}, \tilde{y}^{<n>}) \\ u_y(\tilde{x}^{<n>}, \tilde{y}^{<n>}) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし、式(1)(2)を適用して入側断面内節点座標の試行値を求める際には、あらかじめ y 方向変位 $u_y(x, y)$ が規定されている節点を除くものとする。

図3は、上述の逆行解析手法を、CORMILL Systemに組み込んだ結果をフローチャートとして示したものである。本報にて示す逆行解析手法は、入側断面内の節点座標を変更しつつ、定常三次元解析を5~15回繰り返し、式(2)により求まる入側断面上節点座標 $(\tilde{X}^{<n>}, \tilde{Y}^{<n>})$ が十分収束した場合をもって終了させるものとする。なお、本逆行解析手法は基本的には試行錯誤法とも呼べるものではあるが、より発展した手法として、出側断面形状・節点座標の変動に対応する入側断面内節点座標の変動を影響係数として定義し利用することにより、より能率良く逆行解析を行い得る可能性もある。

3. 解析結果

以後に、帯板圧延、線材圧延および薄板圧延を例にとり、逆行解析手法を適用した結果を示す。

3.1 線材圧延への適用例

まず、線材圧延(オーバルパス)を例にとり、本報にて提案する逆行解析手法の特性につき検討した結果を示す。孔型の曲率半径 r_0 は50mmであり、ロールの弾性変形は無視した。そのほかの計算条件は別報²⁾を参照されたい。

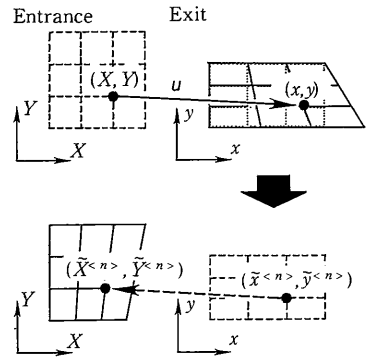


図2 圧延前断面形状の最適化手法

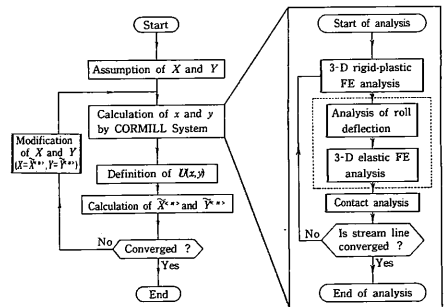


図3 フローチャート

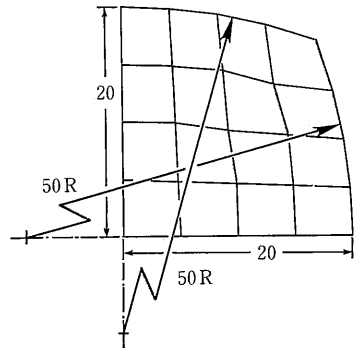


図4 目標とする圧延後断面形状

図4に、目標とする圧延後断面形状および要素分割を示す。ここでは、圧延後の自由表面部の曲率半径が孔型の曲率半径と等しくなるように、素材の入側断面形状および入側断面内節点座標を最適化する。しかしながら、素材の出側断面形状および出側断面内節点座標を規定するのみでは、対応する入側断面形状を一意にもとめることはできない⁵⁾ため、図5に示すように、素材上面の各節点の y 座標を規程しつつ解析を実行することとした(見方を変えれば、素材上面の各節点<n>の圧下量を規定しつつ入側断面形状および入側断面内節点座標の最適化を

研 究 速 報

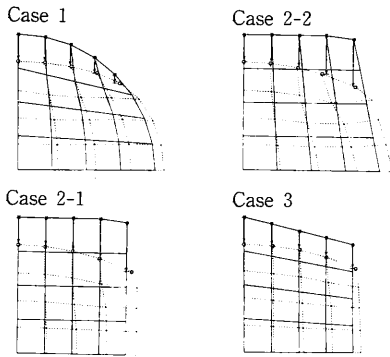


図 5 圧延前断面形状の初期値および対応する圧延後変形状

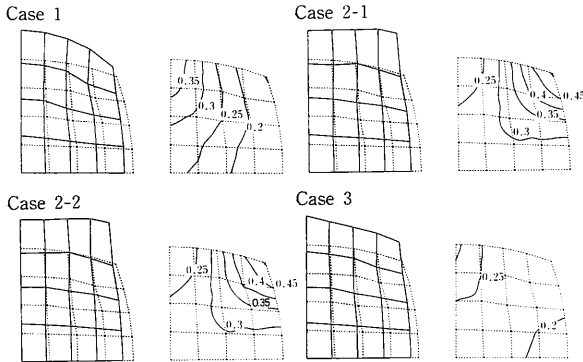


図 6 圧延前断面形状の最適値および相当ひずみ分布

行っていることになる)。逆行解析を開始するにあたり初期値として与えた素材入側断面形状および節点座標は、図 5 に示す 4 種類であるが、内 Case 2-1 と Case 2-2 とは、素材上面の各節点 n の圧下量が同一であるため、それぞれ同一の入側断面形状が、逆行解析による最適解として求まることが予想される。このことは、本報にて示す逆行解析手法において、どのような範囲で解の一意性が保証され得るのかといった本質的な問題を含んでいるが、ここでは、Case 2-1 と Case 2-2 の逆行解析による最適入側断面形状および節点座標をもとに、時間逆行解の一意性を検討することとした。図 5 中の点線は、逆行解析を開始するに際して最初に仮定した断面形状および節点座標に対応して求めた、圧延後断面形状および節点座標を表しているが、この段階では、Case 2-1 と Case 2-2 の圧延後断面形状および圧延後断面節点座標は一致していないことに注意されたい。

図 6 に各条件に対する、最適化された入側断面形状・節点座標および相当ひずみ分布を示す。Case 2-1 と Case 2-2 では同一の入側節点座標ならびにひずみ分布が最適解として得られており、逆行解析を開始するに際して最初に仮定した断面形状および節点座標によらず、素

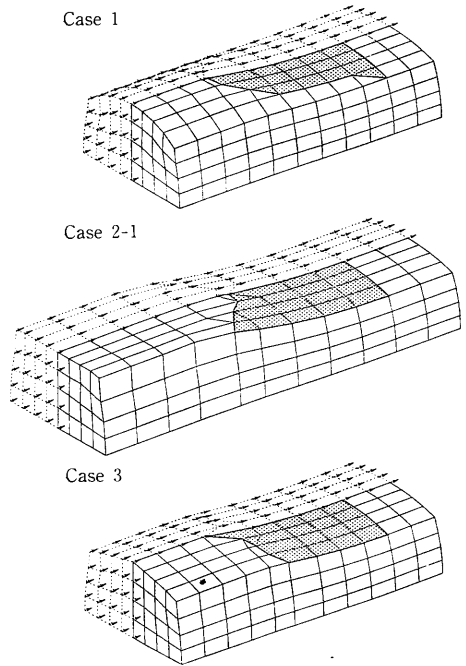


図 7 最適化後の三次元変形状

材上面各節点の圧下量を境界条件として与えることにより、解が一意に得られていることがわかる。

図 7 は、Case 1, Case 2-1, Case 3 の最適化された三次元変形状である。これらの逆行解析には、HITAC M682H で約 100 分の計算時間を必要とした。

3.2 帯板圧延への適用例

本節では、帯板圧延における自由表面部バルジ変形を最小化し、圧延後板幅が目的値となるために必要な入側断面形状を、逆行解析により求めた例を示す。圧下率 R をそれぞれ 10%、20%、30%、40% と規定しつつ入側断面形状・節点座標を最適化した。なお、ロール径は 200mm、圧延速度は 18.8MPM であり、ロールの弾性変形は無視した。そのほかの計算条件は前節と同一である。

図 8 に逆行解析の結果得られた入側断面形状・節点座標の最適解を比較して示す。各条件ともに自由表面部でのバルジ変形を相殺するために必要な凹形の入側自由表面形状が得られており、また、ロールバイト内での幅広がりに対応して、圧下率が大きくなるほど入側板幅が小さくなっていることがわかる。図 9 には、入側断面形状・節点座標を最適化した場合の三次元変形状を、圧下率 $R=30\%$ の場合につき示す。逆行解析による入側断面形状最適化後には、圧延後のバルジ変形が生じていないことがわかる。本節にて示した逆行解析には、HITAC M682H で約 15 分の計算時間を必要とした。

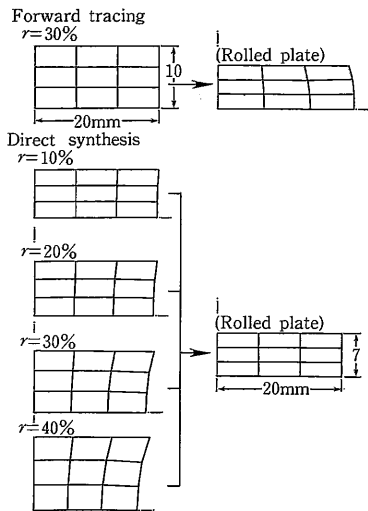


図 8 最適化前および最適化後の断面形状

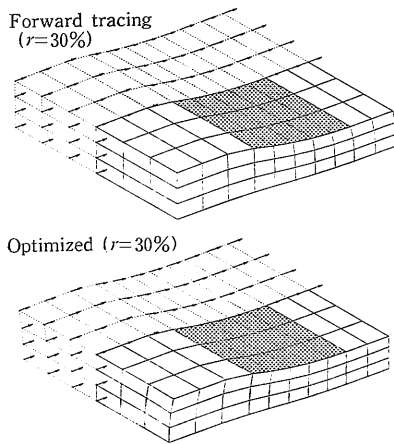


図 9 最適化後の三次元変形状

3.3 薄板圧延への適用例

別報⁹⁾にて示す 4 段圧延機によるモデル圧延条件に準拠した解析を実行した結果を以下に示す。入側断面形状が平坦である場合には、図10中○印に示す圧延後板厚分布が解析により得られた。そこで、板厚分布を零とする圧延前断面形状および節点座標を目標値として与えつつ、C10クラウンが約70%低減されるまで逆行解析を実行した。

図10中●印に逆行解析により最適化された入側板厚分布を示す。本条件では 4 段圧延機のロールたわみ変形および表面弾性変形を考慮しており、入側板厚の増加にともないワークロールたわみおよび表面弾性変形が増大する。そのため、出側板クラウン (C10クラウン) を70%低

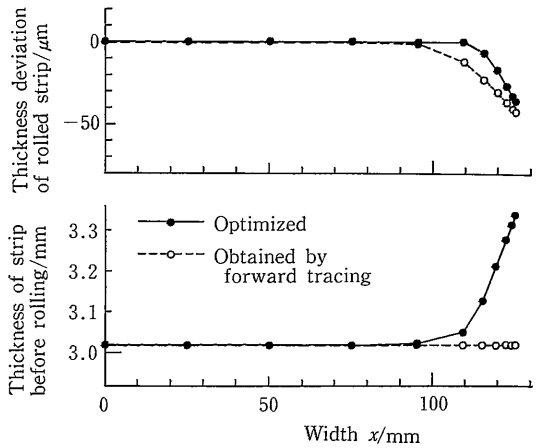


図10 最適化前および最適化後の入出側板厚分布

減するためには、かなり大きな入側板厚分布を付ける必要があるとの結果が得られており、圧延後板形状を考えると必ずしも最適な入側板厚分布とはいい難い面もある。しかしながら、ロールの弾性変形も考慮しつつ逆行解析を行い得る点で、本解析手法は有用な手法であることを示し得たものと考えられる。

4. 結 言

本報では、各種圧延加工プロセスの適応型設計システムの開発の第1段階として、板材ならびに異形材圧延を対象とした時間逆行解析 (Direct Synthesis) 手法の基本的な考え方を示した。また、開発した解析手法を数値圧延機 (CORMILL System) に組み込み解析した事例を通し、その特性に検討を加えた。

今後は、圧延後相当ひずみ分布などの評価基準を導入しつつ、本解析逆行手法の機能の向上はかる予定である。さらに、知識獲得システム・推論機構などとの融合をはかりつつ、各種圧延加工プロセスの適応型設計システムの開発を進めていく予定である。

(1991年 8月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 柳本ほか：41回塑加連講論 (1990), 351.
- 2) 柳本ほか：41回塑加連講論 (1990), 355.
- 3) Kobayashi, S.: Proc. 1st ICTP Vol. 2 (1984), 1035.
- 4) Kang, B.S. et al: Int. J. Mach. Tools Manufact., 30-1 (1990), 43.
- 5) 小坂田：昭62春塑加講論 (1987), 489.
- 6) 佐々木ほか：平3春塑加連講論, (1991), 157.