

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol. 23(1991) No.3

継目無鋼管圧延順序組エキスパートシステム

Expert System for Manufacturing Sequence Determination in Hot-Rolling Process of Seamless Steel Pipe

深谷 直文(Naofumi Fukaya) 片桐 忠夫(Tadao Katagiri)

要旨：

川崎製鉄知多製造所は、継目無鋼管の圧延順序組をエキスパートシステムで実現した。システムの構成は、生産管理システムが稼働するメインフレームと、推論処理が稼働するワークステーションをオンライン接続した分散処理構成で実現した。編集にあたっては、C言語ベースの自社開発ツールを用いた。知識ベースはプロダクション型を、また推論方式は前向き推論を基本としている。本システムは、100%近い適合率を実現し、大幅な作業効率の向上を実現している。

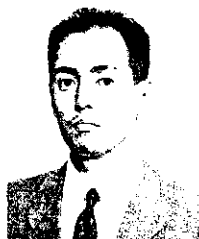
Synopsis：

Kawasaki Steel Chita Works has developed an expert system for determining the manufacturing sequence in the hot-rolling process of seamless steel pipe based on knowledge engineering. This expert system is allocated in the workstation as a back-end co-processor connecting to the mainframe computer using a distributed system technology. To build this system, the authors implemented with their self-developed expert system tool coded in C. This knowledge-based model is founded on the forward chaining inference with production rules. The manufacturing sequence by this expert system can archive the optimization of almost 100% of what professionals usually do.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Expert System for Manufacturing Sequence Determination in Hot-Rolling Process of Seamless Steel Pipe



深谷 直文
Naofumi Fukaya
川鉄システム開発(株)
第2事業本部知多事業
所



片桐 忠夫
Tadao Katagiri
知多製造所 製造部鋼
管技術室 主査(掛長)

1 緒 言

知識工学を応用したエキスパートシステムは、専門家の知識・経験をベースに専門領域の問題解決を行う AI 技術の応用の一つである^{1,2)}。知多製造所では、1989 年よりエキスパートシステムの導入を前提にテーマの調査を行い、「継目無鋼管圧延順序組システム」を選定した。本テーマはエキスパートシステムでは実用化が比較的難しいといわれている典型的な合成型の問題である。専門家は過去の経験の積み重ねによって学習してきた運用基準（構造化・文書化されていない知識）を駆使して柔軟に問題を解決している。我々はこの運用基準および専門家の問題解決手順を、自社開発ツールを用いて知識をベース化することによりシステム化を図った。本稿では、圧延順序組に対する各種要件の配慮点、システム構成、順序組問題に対する知識ベース（問題解決方式）と評価について報告する。

2 継目無鋼管圧延順序組の概要

2.1 圧延プロセス概要^{3,4)}

当社の継目無鋼管は、炭素鋼、低合金鋼およびステンレス鋼など多岐にわたり、その用途も各種配管、油井管、ラインパイプ、ボイラ・熱交換器用、機械構造用、材料管とさまざまである。それらを外径寸法により、小径継目無鋼管工場および中径継目無鋼管工場で製造している。今回エキスパートシステムによる圧延順序組を行ったのは小径継目無鋼管の圧延順序組業務である。継目無鋼管の製造工程を Fig. 1 に示す。主な工程は次のとおりである。

- (1) 水島製鉄所で製造された丸鋼片を回転炉で加熱し、ピアサーミルによって穿孔し中空素管にする。

要旨

川崎製鉄知多製造所は、継目無鋼管の圧延順序組をエキスパートシステムで実現した。システムの構成は、生産管理システムが稼働するメインフレームと、推論処理が稼働するワークステーションをオンライン接続した分散処理構成で実現した。構築にあたっては、C 言語ベースの自社開発ツールを用いた。知識ベースはプロダクション型を、また推論方式は前向き推論を基本としている。本システムは、100% 近い適合率を実現し、大幅な作業効率の向上を実現している。

Synopsis:

Kawasaki Steel Chita Works has developed an expert system for determining the manufacturing sequence in the hot-rolling process of seamless steel pipe based on knowledge engineering. This expert system is allocated in the workstation as a back-end co-processor connecting to the mainframe computer using a distributed system technology. To build this system, the authors implemented with their self-developed expert system tool coded in C. This knowledge-based model is founded on the forward chaining inference with production rules. The manufacturing sequence by this expert system can achieve the optimization of almost 100% of what professionals usually do.

- (2) 中空素管はマンドレルミルで内外両面から圧延して内径の定形と延伸を行う。
- (3) 再加熱炉で加熱し、hot stretch reducer(HSR) によって所定のパイプ外径・肉厚に仕上げ圧延する。
- (4) クーリングテーブルで冷却後、所定の長さに切断され、精整工程を経て製品として出荷される。

2.2 圧延順序組業務の概要

継目無鋼管は、製品の外径・肉厚により 3 種類の外径の丸鋼片を使用している。丸鋼片の外径ごとに 3 回/月の圧延チャンス（合計 9 回/月）を設けており、圧延チャンス内での製造順序を決めることが圧延順序組である。1 圧延チャンスはおおよそ 400 ロット（1 ロットは外径、肉厚、長さおよび素材規格が同一のオーダをまとめたもの）の圧延量である。

2.3 システム開発の背景

圧延順序組は、鋼管生産管理システムの一つの機能として実行されてきた。しかしながら、昨今の製品仕様様の多様化・高級化に伴い、人間が修正する頻度が高まってきた。計算機システムはサポート資料の提出にとどまり、高度な知識を有した専門家により圧延順序組が立案されていた。一方、社内ではエキスパートシステムの開

* 平成 3 年 5 月 14 日原稿受付

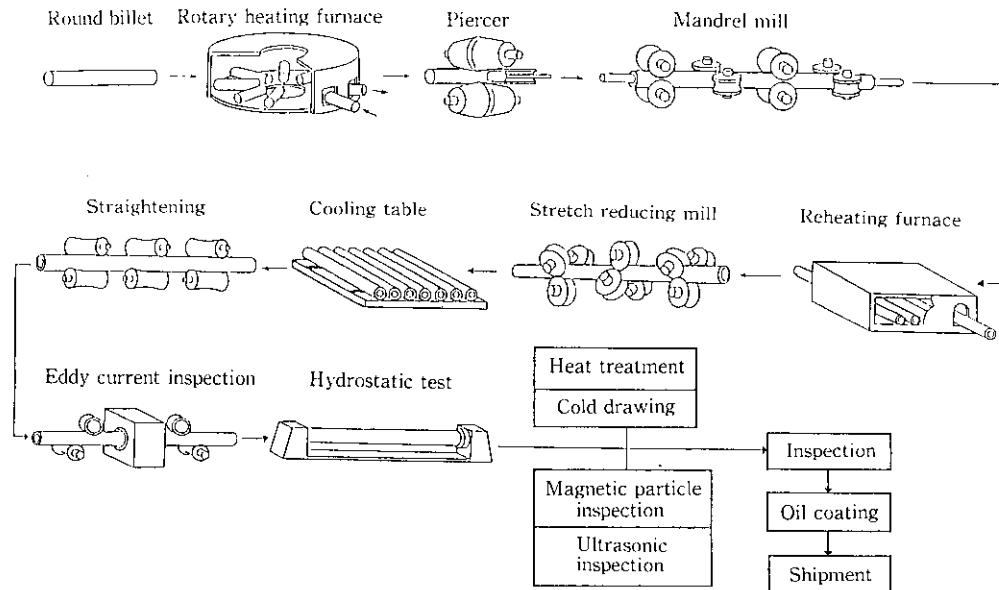


Fig. 1 Seamless steel pipe manufacturing process

発方法論の確立，C言語ベースの自社開発ツールの提供など，システム開発環境が整備されてきた。このような状況のもと，圧延順序組システムをエキスパートシステムとして再構築することとした。

3 システムの概要と特徴

3.1 圧延順序組の要件

圧延順序は，お客様のデリバリー対応と品質を最優先し，製品仕様要件および製造仕様要件を満たしたうえで生産性も考慮して決定しなければならない。圧延順序の決定要件の主要なものは以下のとおりである。

3.1.1 マンドレルミル要件

- (1) 同一マンドレルバーで連続して多数圧延すると，バーの表面が肌荒れ・摩耗し，製品の内面品質を劣化させる。そのため，同一バーによる連続圧延本数を制限する。
- (2) マンドレルロールの表面は，圧延本数が多くなる（ロール履歴が古くなる）にしたがい肌荒れし，製品の外面品質を劣化させる。したがって，外面品質の厳しい製品はマンドレルロール履歴の新しいところで圧延する。
- (3) マンドレルバーの交換は，頻度が多くなるとバー段取りが間に合わなくなり稼働率低下になるだけでなく，圧延温度が変動し品質に与える影響も大きいので，極力少なくする。

3.1.2 HSR ミル要件

- (1) 同一 HSR ロールで連続して多数圧延すると，ロール表面が肌荒れ・摩耗し，製品の外面品質を劣化させる。そのため，同一ロールによる連続圧延本数を制限する。
- (2) HSR のロール交換は，頻度が多くなると圧延温度が変動し寸法・品質に与える影響が大きいので，極力少なくする。

3.1.3 特殊材要件

ステンレス鋼などの特殊材の圧延は品質安定化のため，加熱炉，ピアサー，マンドレルミルでの順位指定，連続圧延本数の制限等特別な配慮が必要である。

3.1.4 生産性要件

前述の品質要件を満たしたうえでマンドレルバーならびに HSR ロールの交換頻度を少なくし，生産性の向上（段取り替え時間の短縮，稼働率の向上）を実現する。

3.2 システムの概要

本システムは，継目無鋼管生産管理システムの一機能である。システム構成は Fig. 2 に示すとおり，生産管理システムのメインフレームとエキスパートシステムのワークステーションをバックエンドにオンライン接続した分散処理としている。以下に概略手順を示す。

- (1) 計画データベースよりデータを抽出し，ワークステーションへダウンロードする（メインフレーム）。
- (2) エキスパートシステムが動作し，制約条件を満足した圧延順序を作成する（ワークステーション）。
- (3) ワークステーションで作成した圧延順序をメインフレームにアップロードし，圧延順序を計画データベースに反映する（メインフレーム）。

3.3 システムの特徴

3.3.1 分散処理

本システムの特徴は前述のようにメインフレームとワークステーションの分散処理構成である。メインフレームは，生産管理システムとのデータ・インタフェースを，ワークステーションは推論処理を実行する。メインフレームとワークステーション間のデータ授受はファイル転送方式を採用し，現時点はモデム接続によるが，高速 LAN 経由への変更を計画している。

3.3.2 知識のドキュメンテーション³⁾

本システムは，自社開発のツール「K Engine」を用いて開発した。知識ベースの記述形式は宣言的で，比較的理解しやすいが，さらに理解を容易にするためルール記述に，説明文としてのコメントを挿入した。この結果，ルール・ソースからルール仕様書の自動生成が可能となり，仕様書とプログラム（ルール）を完全一致とすることができた。

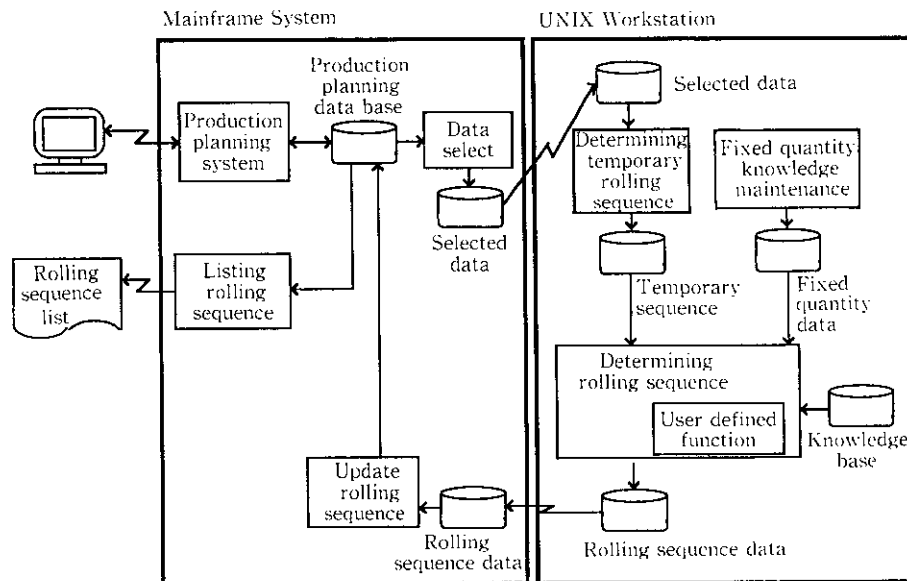


Fig. 2 System image of mainframe and workstation

4 知識処理の特徴

4.1 問題解決方式

ワークステーションの処理としての問題解決方式は、以下に示すとおり大きく三つに分類できる。

(1) 仮スケジューラ

全体の枠組（ロール交換回数、タイミングなど）を決め、その中に普遍的なルールにしたがって圧延ロットを割り振り、仮の圧延順序を作成する。普遍的ルールとは、

- ・スタートポイントロットの決定
 - ・管寸法（外径・肉厚・長さ）を考慮した圧延順序配分
 - ・生産性の考慮
- などである。

(2) 本スケジューラ

専門家のノウハウと関連する定量的知識によって最終的に順序を決定する。

(3) 定量知識の独立

圧延順序の制約条件は知識のメンテナンスを容易にするためエキスパートから独立して管理した。変更が発生しやすい定量知識は推論実行時に動的に主記憶上にロードされる。

知識処理の適用は「本スケジューラ」の部分である。推論の考え方は、特殊材を軸に、一般材を組み合わせ、納期、品質および生産性を満たす圧延順序を生成することである。基本的考え方は以下のとおりである。

- (1) 仮スケジューラによって生成された仮圧延順序に対し、制約事項を満たさない圧延ロットをチェックし、それらを適切なポジションにはめこんでいく。
- (2) 処理は要請度の強い制約事項から順次実施する。
- (3) 「適切なポジションにはめこんでいく」手法の考え方は、制約事項を満たすなかで生産性を低下させないポジションを選ぶことである。例えば、同一サイズのマンドレルバー、HSR ロールを使用しているポジションがあれば、そこにはめこむ。そうすることによってバーやロールの交換が不要になり、生産性

を下げることなく圧延を続けることができる。

処理の概略手順は「仮順序組に対して制約事項を満たさない圧延ロットをチェックする。そのうちの一つを最も望ましい（と思われる）方法で解決する。すなわち、一番最初に制約条件を解決するのが望ましいと思われるロットを、そのロットが移動可能なポジションのうち最も好ましいポジションに移動させるのである。一連の推論によるポジション移動結果を反映した順序組に対して同様の処理を実施する。」これを制約を満たさない圧延ロットがなくなるまで繰り返すことにより、圧延順序を決定する。

4.2 知識ベースのモジュール化^{5,6)}

エキスパートシステムは専門家の知識をルールとして記述し、それを推論エンジンが必要に応じて呼び出す形式でシステムが動作する。ルールの記述順序とシステムの動作は無関係であり、従来型システムとは明らかに違った動き方をする。当社製の開発ツール（K Engine）のルールは IF—THEN 形式で構成されるプロダクション型である。Fig. 3 に示すとおり、専門家の順序組に関する知識に関連する知識のまとまり、すなわちルールセットとして分割し、ルールセットの起動はメタルールが上位で制御している。知識の分割が

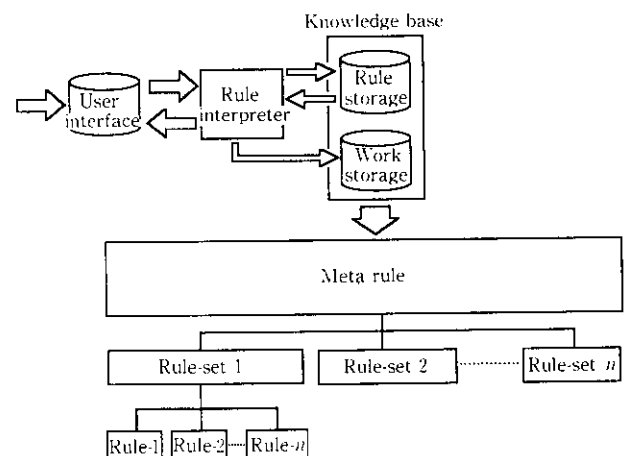


Fig. 3 Production rules and knowledge base structure

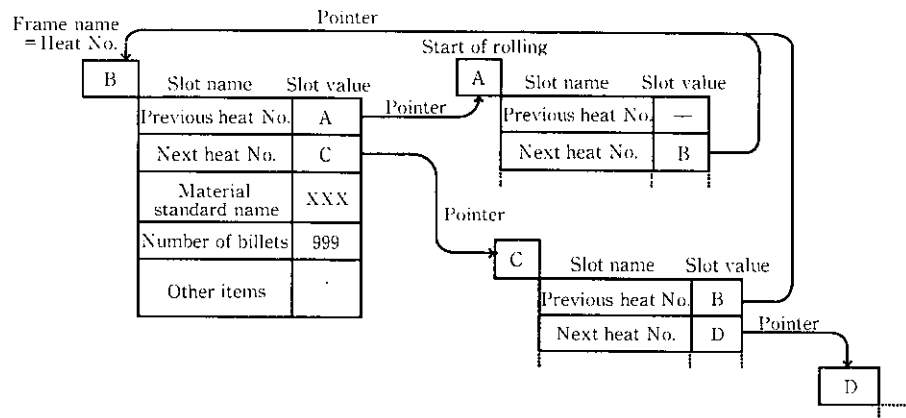


Fig. 4 Frame structure of hot-rolling lot data

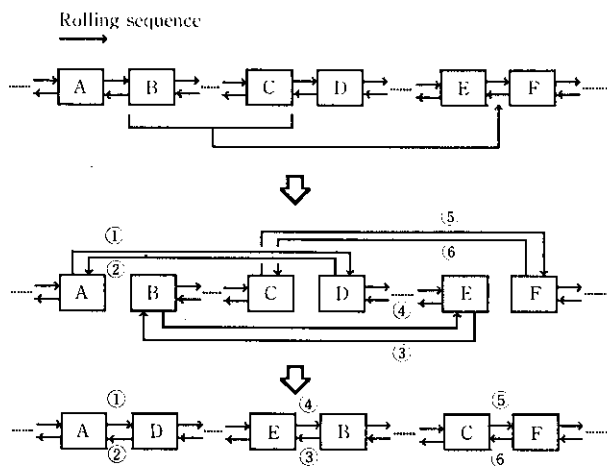


Fig. 5 Rolling sequence pointer operation

推論時間の短縮, 知識ベースの可読性の向上, さらにメンテナビリティを確保している。

4.3 データ構造³⁾

情報を構造化した知識の記憶単位をフレームと呼ぶ。本システムの主要データである制約条件データおよび圧延ロットデータはフレームとして表現している。圧延ロットデータは、並び替えが頻繁に発生することから、順序表現方式としてデータを連鎖的にたどるポインタ方式とした (Fig. 4)。すなわち、一つ一つの圧延ロット・フレームに直前ロットと直後ロットの項目 (スロット) を持たせ、直前データと直後データの関係付けを行っている。Fig. 5 の例に示すとおり、ロット B ~ ロット C をロット E の直後に移動させるための操作は六つのポインタ操作によって可能である。

4.4 処理の効率化⁵⁻⁷⁾

システムの処理効率、実運用を進めるに当たり重要な課題の一つである。一般に、順序組問題は組み合わせ爆発が発生し、最適解を求めるのは実用時間内では難しいといわれている。この対応としては、組み合わせの爆発を抑えるために発見的探索が有効である。すなわち、問題に関する知識を選択する (専門家は、明らかに可能性の低い組み合わせは、直感的に探索候補からはずす) ことによって、探索効率を著しく上げることができる。本システムの解法もこの考え方を基本としているが、テスト段階では知識の洗練度/ツール

の完成度がそれほど高くなかったため、実用レベルの実行性能を得ることができなかった。これに対し我々は、当社製開発ツール「K Engine」の性能改善と知識表現のチューニングによりテスト段階の処理時間を 1/10 へ削減した。改善内容は、使用頻度の高い関数および実行時間の長い関数の内部アルゴリズムを改善したことである。この改善は処理時間とともに作業領域の大幅な削減も実現した。知識表現の改善は、機能をダウンさせることなく、しかもルールの可読性を損なわない範囲で行った。

5 評価と今後の課題

5.1 システムの評価⁸⁾

本システムは 1990 年 8 月に稼働した。稼働後、専門家の修正度合いを分析し、本システムの機能評価を行った。適合率は 100% に近く、専門家並みの順序組結果を達成したと評価している。知識変更の対応は、定量知識ベースをプロダクションルールから外に出したことにより、知識・ノウハウの変更が容易に可能となった。評価結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 作業負荷の軽減

本システムの稼働により確認チェックのみとなり工数は従来の 1/10 以下となった。

(2) 歩留り・生産性の低下抑止

システム稼働前と後の歩留り・生産性はほとんど差がなく、本システムが専門家並みの作業を行っているといえる。

また、本システムの開発をとらえて得た成果は以下のとおりである。

(1) 知多製造所でのエキスパートシステム開発技術者の育成

問題の選定、開発体制、知識の収集・整理、知識構造化といった開発の全工程にわたる体験から、構築技術の取得を達成した。

(2) 自社製ツール的大幅な性能改善および機能の安定化

本システムは K Engine の合成型問題への初試行システムとして位置付けられ、機能強化、性能改善などに大きく寄与した。

(3) 分散処理システムの試行

メインフレームとワークステーションの連携による分散処理形態のシステム開発をとらえて分散システムの適用技術を取得した。

5.2 今後の課題

本システムの開発により、順序組の作業はほとんど専門家の知識技術が必要とせず実行することが可能となり、大きな目的の一つを達成することができた。また本システムの開発を通しエキスパートシステム構築のノウハウを獲得することができた。今後このシステムを有効に機能させ、さらにその適用を広げていくために必要と考えられる課題を以下に示す。

(1) 鋼管製造における新技術への追従

製品の高付加価値化対応、圧延操業技術の向上など、環境変化による圧延順序組要件の変更が予想される。これらの課題に対しエキスパートシステムの特徴を生かし柔軟に対応していく必要がある。

(2) 運用体制の確立

システムのメンテナンス体制が稼働後の活用度を左右する重要な要素である。実務部門の要請をすばやくフィードバックする体制を確立するとともに、エキスパートシステム開発技術者の養成を含めた層の拡充が必要である。

(3) 新技術の普及

本システムの開発を機会に、システム構築技術、分散処理ノウハウといった新技術の普及・拡大活動を継続して推進することが肝要である。

6 結 言

本システムは、仕様の多様化・複雑化などによりほとんど機能をしていなかった従来システムに変わり、エキスパートシステムとして開発してきた。この成果を要約すると以下のとおりである。

(1) 新技術の確立

本システムはメインフレームとワークステーション間の分散処理システム形態で構築し、ワークステーションの活用ノウハウ、メインフレームとの通信など、今後の分散処理環境の基盤となる技術を獲得した。

(2) エキスパートシステム構築基盤の確立

エキスパートシステムの構築に際しては、C言語ベースの自社開発ツール「K Engine」を用いて構築した。本システムの開発は、合成型問題への初適用としてK Engineの機能強化/性能改善に大きく寄与し、ツールとしての完成度を高めた。

(3) 運用性の確保

比較的変更の発生しやすい制約条件（定量知識）は知識ベースから独立して管理し、推論実行時に動的に主記憶上にロードする方式とした。これによりシステムの運用性は大幅に向上した。また、ツールの改善と知識表現のチューニングにより、プロトタイプ段階の処理時間を1/10に削減し、実用化レベルとした。

(4) メンテナンス性の確保

知識ベースからのルール仕様書自動生成を実現し、メンテナンス用ドキュメントとしての活用を可能とした。これによりプログラム（ルール）と仕様書の完全一致を実現した。

(5) 圧延順序組業務の作業負荷軽減

本システムの稼働により順序組業務の作業負荷は、従来の1/10以下となり大幅な作業負荷軽減を実現した。

この結果、本システムの適合率は100%近く専門家並みの順序組結果を達成し、ねらいどおりのシステムが構築できた。一方、当知多製造所のAI技術は緒についた段階であり、専門家に頼った業務は多岐にわたっている。今後、本システムの開発ノウハウを基盤に専門家業務の効率化を図っていくことが重要であると考えている。

参 考 文 献

- 1) 福村 聡, 新井慎也, 佐藤克明: 「エキスパートシステム開発基盤の整備」, 川崎製鉄技報, 23 (1991) 3, 178
- 2) 新井慎也, 福村 聡, 前田一郎, 飯田 修, 山川栄樹: 「エキスパートシステムの活用」, 川崎製鉄技報, 20 (1988) 2, 76-81
- 3) 佐山泰弘: 「川崎製鉄の鋼管製造技術の現状」, 川崎製鉄技報, 22 (1990) 4, 219-227
- 4) 川崎博章, 相山茂樹, 片桐忠夫, 粕谷利明, 高橋一成, 清水哲雄: 「シームレスステンレス鋼管」, 川崎製鉄技報, 22 (1990) 4, 291-293
- 5) 菊地みどり: 「エキスパートシステム構築支援ツール K Engine」, 川崎製鉄技報, 23 (1991) 3, 261
- 6) 和多田作一郎: 「AIの基礎を知る辞典」, (1986), 102-103, 127-139, 298-329, [実務教育出版]
- 7) C. I. Forgy: "A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem", *Artificial Intelligence*, 19 (1982) 17-37