

エキスパートシステムによるコイル巻き直し 組合せ*

川崎製鉄技報
23 (1991) 3, 196-202

Automation of Coil Combination Operation by Expert System



穴吹 善範

Yoshinori Anabuki

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(掛
長)



尾脇 林太郎

Rintaro Owaki

水島製鉄所 制御技術
部制御技術室



崎山 英昭

Hideaki Sakiyama

水島製鉄所 電磁鋼板
部電磁鋼板技術室

1 緒 言

コイル巻き直し組合せとは、電磁鋼板精整ライン¹⁾の巻き直し設備における操業計画のことであり、複雑な操業条件やオーダー規制を考慮しつつスリットコイルを複数組合せ、疵のない製品コイルを効率よく作成する機能である。この組合せは、スリットラインにおいてスリットしたコイルの一級品総重量がオーダー受注量範囲になったタイミングで行い、巻き直しの必要なコイルの操業計画を立案するとともに、必要量だけコイルスリットすることにより過剰スリットを防止する。

従来、巻き直し組合せは、操業者が経験により少数のコイルを組合せて実施していた。このため、1オーダーあたりの巻き直しコイル数が多い場合は、4～5コイル単位での巻き直し計画を立案せざるを得ず、組合せ不可能なコイルが発生し、歩留りの低下を招いていた。さらに、操業者の技量により巻き直し設備のコイル処理能力も異なるという問題があった。また、組合せるタイミングが実際にコイル巻き直しを行う直前であるため、製品コイルの重量が受注量範囲に達せず追加スリットが必要になったり、これとは逆に受注重量範囲をオーバーして過剰スリットになる場合があった。したがって、コイル巻き直し組合せの自動化は、巻き直し設備の生産性および歩留り向上のための大きな課題であった。

一方、最近、計画・スケジューリング問題に対して、専門家の知識をシステム化したエキスパートシステムが実用化されてきた²⁾。計画問題は、OR的手法で最適解を求めようとした場合、組合せ爆発などの問題が生じやすい難しい問題であり、システム化のためには多大な工数が必要である³⁾。専門家は、この問題を経験によって探索空間を大幅に縮小することにより、実用的な時間で条件を満足

要旨

水島製鉄所の電磁鋼板精整ラインにおいて、複数のスリットコイルを組合せて疵のない製品コイルを作成するためのコイル巻き直し組合せにエキスパートシステムを適用した。本エキスパートシステムは、プロセスコンピュータ内に構築されたルール数100の前向き推論型システムで、30コイルの組合せを5分以内で処理する。この結果、従来オペレータが経験で処理していた複雑な問題を自動化できるとともに、巻き直しにおける歩留りが向上した。本システムは、1990年3月のライン営業運転以来、順調に稼働中である。

Synopsis:

Mizushima Works of Kawasaki Steel Corp. has applied an ES (expert system) to the designing of electrical steel coil combination, which aims at the highest efficiency in assembling product coils from defect-removed-material slit coils. Constructed in a process computer system, the ES, which consists of 100 forward reasoning rules, executes combination of 30 coils within 5 min. As the result of adopting the ES, complicated coil combination problems, which were only dealt with by experienced operators in the past, have come to be solved automatically with improved yield in the recoiling process as well. The ES has been successfully working since its commissioning in March 1990.

する解を得ている。これに着目し、専門家の知識を利用して計画問題を解くシステムが計画型エキスパートシステムである。今回、このエキスパートシステムを典型的な計画問題であるコイル巻き直し組合せ問題に適用した。本報告では、コイル巻き直し組合せにエキスパートシステムを導入した背景とその概要および適用結果について述べる。

2 開発の背景

2.1 巻き直し組合せの概要

2.1.1 巻き直し設備の構成

電磁鋼板精整ラインのコイル処理方法を Fig. 1 に示す。前工程の疵検査装置の情報にもとづき、スリット設備で鋼板表面を目視検査した結果、無欠陥コイルと判定されたコイルはそのまま製品として出荷されるが、部分的に疵が存在すると判定されたコイルは、複数組合せられ、疵が除去されて製品コイルとなる。このコイルの組合せを処理する設備が巻き直し設備である。Fig. 2 に巻き直し設備のレイアウトと具体的なコイル組合せの方法を示す。巻き直し設備

* 平成3年4月3日原稿受付

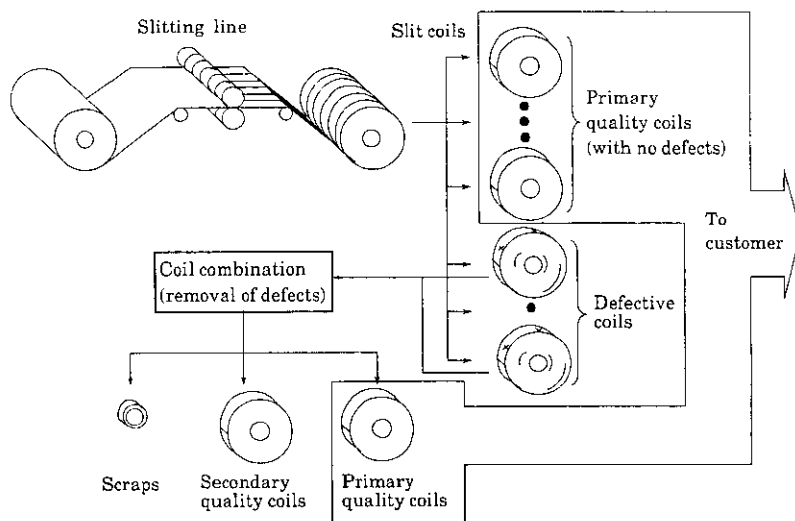


Fig. 1 Coil operation in finishing line

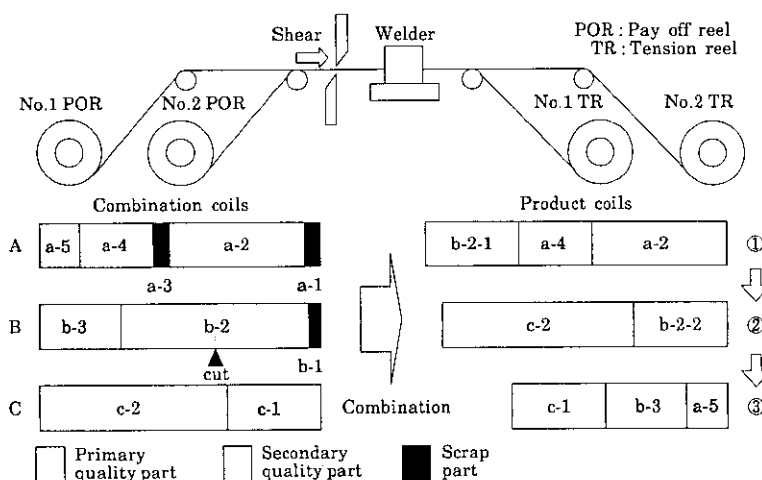


Fig. 2 Layout of welding and recoiling line and its operation method

は、ペイオフリール (POR) 2 式, テンションリール (TR) 2 式で中央にシャーとウェルダを配置するラインである。組合せ対象コイルは、コイル内を一級品と注外品および不用品の 3 種のランクに格付けされたコイルであり、コイル内の格付けされた部分をパーツと称する。作業方法としては、組合せコイルを POR に装入し、パーツ単位でシャークットと溶接を繰り返しつつ一級品は No. 2 TR に、また注外品は No. 1 TR に巻き取る。不用品は、端板処理するかあるいはどちらかの TR に巻き取った後そのまま抜き取り、スクラップ処理する。巻き直し設備における作業計画の難しさは、二つの TR に 3 種類のランクのコイルを効率よく巻き取ることであり、しかも製品コイルについては溶接点数、パーツ長などのオーダー条件を満足していることが必要である。したがって、巻き直し設備における作業は、コイルの通板、シャークット、巻き取り、巻き戻し、抜き取りを頻繁に行う非常に複雑な作業である。

2.1.2 作業条件

巻き直し設備における作業条件およびオーダー条件を以下に示す。コイルの組合せは、これらの条件を満足しつつ、組合せ不可能なパーツを発生させないとともに溶接回数および通板回数を極力おさえ、作業能率を向上させることが必要である。すなわち、最良の巻き直し組合せとは、組合せ対象コイルに対する歩留りと作業能率が

最大になる組合せである。

(1) POR の使用方法

作業能率の向上のため、以下の方法をとる。

- (a) POR に装入したコイルは、基本的に他のコイルと組合せて TR に巻き取る。組合せ途中で POR から抜き取らない。
- (b) 最内巻の不用品は、TR に巻き取らず POR から抜き取りスクラップ処理する。
- (c) 最外巻に不用品があり、他は一級品であるコイルは、最外巻の不用品を除去したのち POR から抜き取り製品とする。

(2) TR の使用方法

一級品: 他の一級品と溶接しつつ No. 2 TR に巻き取る。
注外品: 他の注外品と溶接しつつ No. 1 TR に巻き取る。
不用品: 空いた TR に巻き取る。よって、不用品を TR に巻き取る場合は、必ずどちらかの TR が空いていることが必要である。

(3) TR からのコイル抜き取り条件

一級品: コイル長がオーダーで許容された範囲内である。
注外品: コイル長が作業上許容された範囲内である。ある

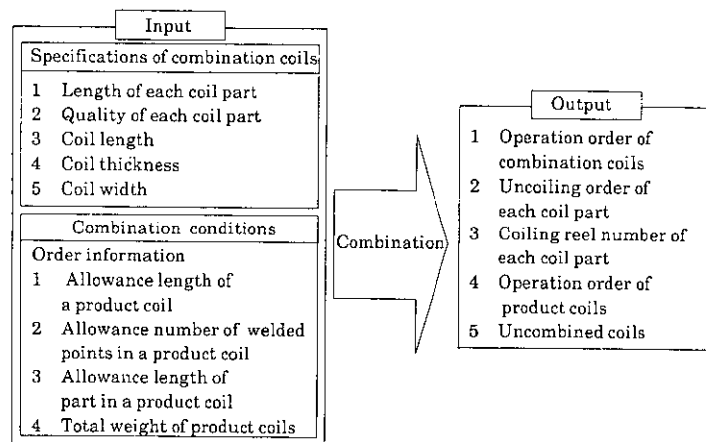


Fig. 3 Functions of coil combination

いは、溶接点数が上限値である。

不用品: TRに巻き取るたびに抜き取る。すなわち、他の不用品と溶接せずスクラップ処理する。

(4) オーダ条件

受注重量: 受注重量には上限値・下限値が存在する。コイル組合せによる製品コイルの総重量が、この上限値と下限値内に入るようにする。

コイル長: 製品コイル長に上限値と下限値が存在する。

溶接点数: 製品コイル内の溶接点数に上限値が存在する。

パーツ長: 製品コイル内のパーツ長に下限値が存在する。

コイル巻き直し組合せの機能を Fig. 3 に示す。これからわかるとおり、巻き直し組合せとは、組合せ対象となるコイルを組合せ条件のもとにパーツ単位で組合せ、パーツごとに払い出し順番、巻き取り TR No., 抜き取り順番などを決定する機能である。

2.2 巻き直し組合せの課題

コイル巻き直し組合せの課題は、巻き直し対象コイルに対する歩留りを最大にするとともに、コイルをスムーズに処理できる操作方法を立案することである。従来は、巻き直し設備の操業者が経験により少数のコイルを組合せていたため、巻き直しコイル数が多い場合は、4~5コイル単位での巻き直し計画を立案せざるを得ず、組合せ不可能なコイルが発生し、歩留りが低下していた。また、操業者の巻き直し組合せの技量により巻き直し設備のコイル処理能力も異なる、という問題があった。したがって、歩留り向上と巻き直し技術の標準化のため、コイル巻き直し組合せの自動化が強く望まれていた。

前述したとおり、巻き直し組合せは基本的にパーツ単位で組合せるため、パーツ長という不連続量を扱う計画問題である。また、複雑な操業条件とオーダ規制を満足するアルゴリズムを定式化する必要がある。一般に、連続量を取り扱うプロセスにおける計画問題には、線型計画法がしばしば用いられる。一方、巻き直し組合せ問題には、不連続量を扱う計画問題という以外に、以下の特徴がある。

- (1) 最適化を評価すべき関数が定式化できない。
 - (2) 最適化問題として解を求めようとした場合には、制約条件式や未知パラメータが多くなりすぎ、現実的な時間内では解が得られないという組合せ爆発を起こす可能性がある。
 - (3) 熟練操業者は、発見的方法により、最適解ではなく満足解を現実的な時間で得ている。
- これらの特徴により、巻き直し組合せ自動化の手法としては、線

型計画法ではなく、最近、計画問題に適用され効果をあげているエキスパートシステムを採用した。エキスパートシステムは、定式化が難しい問題であっても、プロトタイプモデルに順次知識を追加することにより、段階的に熟練操業者の発見的な操作方法のシステム化が可能である。今回もこのメリットを生かし、エキスパートシステムをコイル巻き直し組合せに適用する方針とした。

本エキスパートシステムの目的は以下のとおりである。

(1) 自動化

巻き直し組合せを自動化して、巻き直し技術の標準化を行うとともに技術伝承を行う。エキスパートシステムは、知識(巻き直し技術)と推論が分離され、しかも知識がルール形式で日本語で記述されているため、知識の可視性に優れ保善性もよい。

(2) 歩留りの向上

通常の1オーダにおける巻き直し組合せ対象コイルは20コイル以内である。本エキスパートシステムは、30コイルまでの組合せ対象コイルを一度に組合せることにより、通常の1オーダ内の巻き直し対象コイルすべてを考慮した巻き直し組合せが可能である。これにより未組合せ一級品パーツの発生をおさえ、歩留りを向上させる。30コイル以上の組合せは、コイルを30コイル単位に分割し、組合せを複数回行う。なお、組合せ歩留りの定義は、次式で与えられる。

$$\text{歩留り} = \frac{\text{製品コイル一級品総重量}}{\text{組合せ対象コイル一級品総重量}}$$

(3) 作業能率の向上

1オーダすべての巻き直し対象コイルを考慮した巻き直し組み合わせを行うことにより、溶接回数、通板回数、コイル抜き取り回数などの各作業回数を極力おさえる組合せを行い、作業能率を向上させる。ただし、歩留りの向上と作業能率の向上が競合する場合は、歩留り優先の組合せを行なう。

(4) 過剰スリット防止

巻き直し組合せは、スリットコイルの一級品総重量が受注重量範囲になったタイミングで行う。スリットコイルのうち、疵が存在するコイルの組合せを実際に行い、組合せ結果の歩留りから受注重量範囲に到達するために必要な追加スリットコイル量を算出し、スリット設備の運転者にガイダンスする。追加スリットを行った後は、再度組合せを行う。製品コイル一級品総重量が受注重量範囲に到達するまでこれを繰り返す、スリット設備における過剰スリットを防止する。

3 システム構成

3.1 機能分担

巻き直し組合せは、Fig. 4 に示すとおり生産管理用コンピュータ (O/C) の巻き直し組合せ命令を、プロセスコンピュータ (P/C) のエキスパートシステムで処理し、組合せ結果を O/C に送信することにより実現される。O/C は、組合せ結果をもとにコイル単位で巻き直し設備への搬送命令および操業命令を作成する。すなわち、P/C は巻き直し組合せに関しては、O/C の組合せエキスパート専用マシンとして機能する。巻き直し組合せの O/C と P/C の機能分担を以下に示す。

3.1.1 O/C

- (1) スリット出側にスリットコイルが発生するたびに、それまでのスリットコイルも含めた 1 オーダすべての一級品総重量を算出する。一級品総重量が受注量範囲になったタイミングで、コイルの格付け情報にもとづき組合せコイルを選択し、巻き直し組合せ命令を P/C に送信する。基本的に巻き直し対象コイルは、疵の存在するコイルである。
- (2) 組合せ結果を P/C から受信し、コイル単位で巻き直し設備への搬送命令および操業命令を作成する。組合せの結果、製品

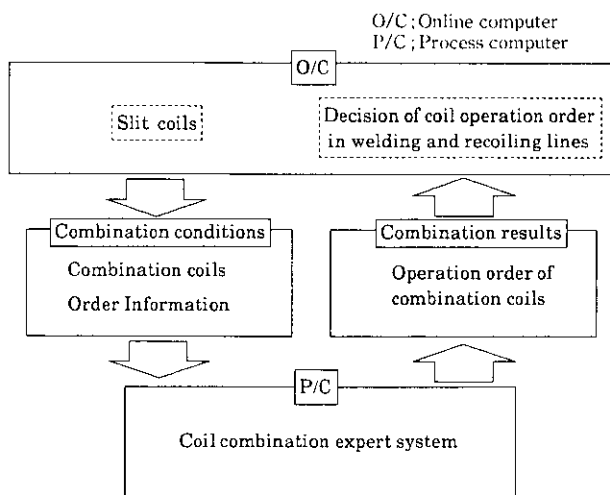


Fig. 4 Information flow of coil combination

コイル一級品総重量が受注重量範囲未達の場合は、追加スリット実施後、再度コイルを選択し組合せを P/C に実行させる。

3.1.2 P/C

- (1) O/C の巻き直し組合せ命令に基づき、エキスパートシステムでコイルの組合せを行い、結果を O/C に送信する。
- (2) 組合せ結果を CRT に表示して、受注重量範囲に到達するために必要なスリットコイル量を、スリット設備の運転者にガイダンスする。

3.2 システム構成

前述した機能分担を実現するためのコイル巻き直し組合せのシステム構成を、Fig. 5 に示す。特徴は以下のとおりである。

- (1) P/C は、HIDIC V90/45 であり、エキスパートシェルは EUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation Version 2)⁵⁾ である。
- (2) 巻き直し組合せエキスパートシステムは、精整ラインの自動搬送設備を含む全設備の自動運転を行う P/C 内に構築されるため、全体の機能に影響が出ない範囲に CPU 負荷を抑える。そのため、P/C 内での処理の優先順位を低く設定した。

4 エキスパートシステムの概要

4.1 開発方法

本エキスパートシステムの開発方法としては、Fig. 6 に示すとおり基本知識を取得した後、プロトタイプモデルをワークステーション上に構築し、実際に組合せ問題をプロトタイプモデルで解くことにより、知識の検証・追加を行った。すなわちプロトタイプングアプローチでシステム構築を行った。

4.1.1 知識取得

まず、専門家に組合せ問題の例題をいくつか解いてもらうことにより基本知識を得て、それをルールの形にまとめた。その後、そのルールをもとに他の組合せ問題が解けることをハンドシミュレーションにより確認した。解けない場合はその原因を明らかにし、原因が知識の不足にある場合は、ルールを追加した。これを、約 20 題の例題が完全に解けるようになるまで繰り返した。このとき得られた組合せの知識は以下のとおりである。これより、専門家は探索空間を狭めて組合せを容易にしていることがわかる。

- (1) パーツ構成の複雑なコイル一つに対し単純なコイルを 2~3 個組合せて製品コイルを 2~4 コイル採取し、一つの組合せを

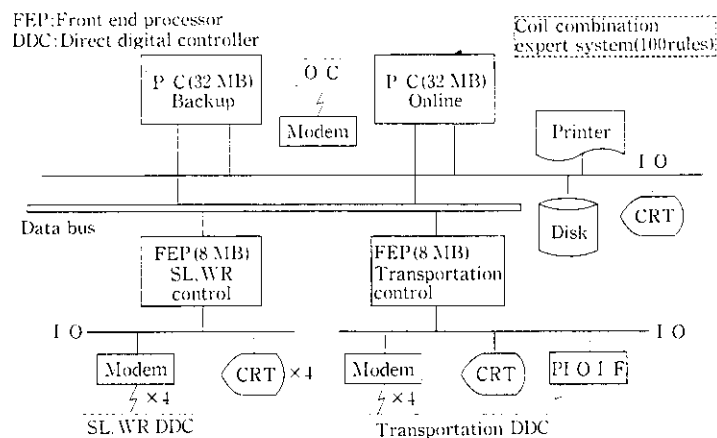


Fig. 5 System configuration of process computer in finishing line

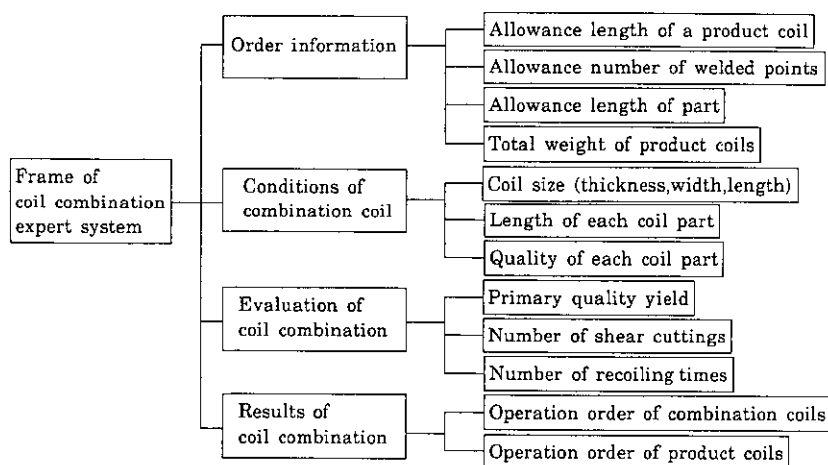


Fig. 9 Configuration of frame of coil combination expert system

Fig. 8 および 9 に示す。これからわかるとおり、組合せコイルの情報はフレームの知識として、また、組合せ方法はルールの知識として表現した。エキスパートシステム全ルール数は 100 である。

4.3 エキスパートシステムの推論方法

本エキスパートシステムのコイル組合せ方法を以下に示す。

- (1) 組合せペアとなるコイルを決定するため、極力パーツ構成の複雑なコイルを 1 コイル選択する。
- (2) 選択したコイルのパーツ構成および組合せ条件を考慮して、このコイルと組合せて製品コイルが作成できる単純なコイルを組合せのペアとして選ぶ。
- (3) 製品コイルを 1 コイル作成後、同様に次のペアコイルを選択する。以下これを繰り返す。

以上より、コイル巻き直し組合せは一種の探索問題であることがわかる。探索問題の代表的解法⁹⁾として適用されている方法は、以下の二つである。

縦型探索法： あらかじめ探索の深さを決めておき、その決められた深さを越えたときは、探索を元に戻し再度探索を続ける方法。

横型探索法： 探索の局面で可能性のある探索をすべて実行する

方法。

いずれの方法も、より最適な探索を行うためにはよいが、コイル数がある数以上の場合には組合せ爆発を起こし、実用的な時間では解が得られない。そこで、本エキスパートシステムは最適解ではなく満足解を得る方針とし、熟練操業者の発見的な解法をシステム化した。したがって、推論動作も組合せコイルを後戻りしないで探索する前向き推論とし、処理時間を短縮した実用的なシステムとした。

5 適用結果

エキスパートシステムをコイル巻き直し組合せに適用した結果、従来、操業者が経験で行っていた複雑なコイル組合せを自動化できた。主な適用結果は以下のとおりである。

5.1 組合せ能力

エキスパートシステムによる自動巻き直し組合せ結果を Fig. 10 に示す。また、同じ組合せ問題をオペレータが実施した結果との比較を Table 1 に示す。エキスパートシステムによる組合せの方が歩留りがよく、しかも POR および TR からのコイル抜き取り回数も

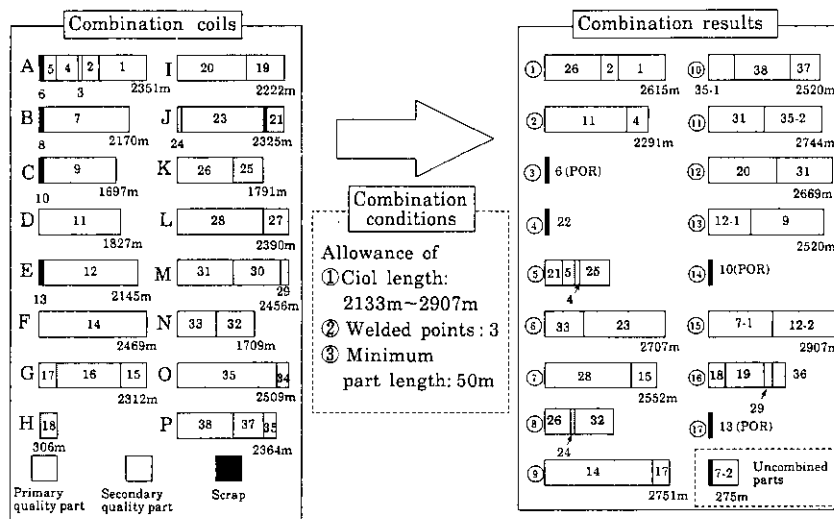


Fig. 10 Coil combination by expert system

Table 1 Comparison of coil combination between expert system and operator

	Operator	Expert system
Primary quality yield	93.1%	99.0%
Secondary quality yield	93.4%	100%
Shear cut times	21	24
No. 1 TR operation times	6	4
No. 2 TR operation times	10	10
POR operation times	8	3
Welding times	14	18

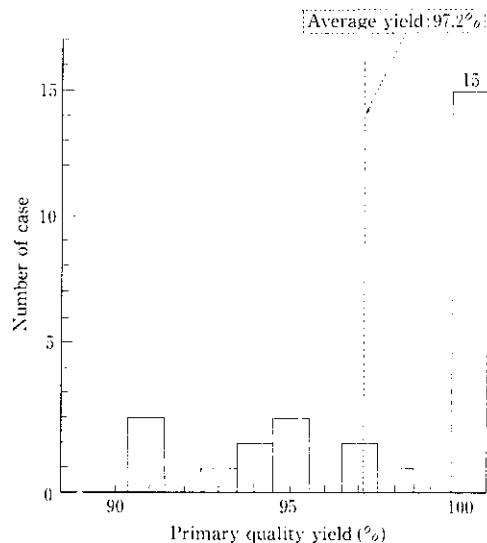


Fig. 11 Combination ability of expert system

少ないことがわかる。溶接回数とシャークカット回数はエキスパートシステムの方が多いが、これはオペレータがパーツ構成の複雑な部分を格付け変更してまとめて処理しているためであり、全体としてはエキスパートシステムの方がレベルの高い組合せを行っている。

また、他の組合せを28ケース行った結果をFig. 11に示す。15ケースの組合せで歩留り100%を達成している。また、平均歩留りは97.2%であり、最低歩留りも90%を実現した。歩留り100%を達成できなかった組合せもそのほとんどが専門家でも完全に組合せできなかったケースであるから、エキスパートシステムによる自動組合せは成功していると判断できる。

5.2 応答性

本エキスパートシステムは、自動搬送設備の制御を含む精整ライン全設備の自動運転を行うP/C内で実行されるため、他の設備の制御に影響を与えない範囲で応答性を確保する必要がある。プログラムの優先順位を低く設定してオンライン状態で10コイルの組合せを1分、30コイルの組合せを5分以内で実行でき、問題のない応答性を実現した。

5.3 開発性

ワークステーション内でのプロトタイプモデルをシミュレーションすることにより、システムの段階的構築が可能であった。また、ワークステーションはエキスパートシェルのデバッグが完備しているため、複雑な組合せ方法を短期間でシステム化できた。また、シミュレーションでデバックが十分できたため、オンライン後の不具

合をゼロに抑えることができ、品質の高いソフトウェアが作成できた。

5.4 安全性

ターゲットマシンであるP/Cにおけるエキスパートシステムの安全性は、デバッグを使用できないデメリットはあったものの問題は発生していない。

- (1) エキスパートシステムのプログラムは、組合せルールが日本語ベースで記述されているため、プログラムの可視性が従来のソフトウェアよりも向上した。また、本エキスパートシステムはDDCとのインターフェースがなく、O/Cの巻き直し組合せ専用機能となっているため、構造が単純であり、ほとんどの場合ルールの修正のみで組合せ方法の変更ができた。
- (2) 一方、P/Cにおけるプログラム修正は、OSの環境がワークステーションと異なるため、デバッグが使用できなかった。したがって、ダンプ機能をアプリケーションプログラムで組み込む必要があり、実行環境における調整はやや不便であった。

6 結 言

電磁鋼板精整ラインのコイル巻き直し組合せにエキスパートシステムを適用した。この結果は以下のとおりである。

- (1) エキスパートシステムにより典型的な計画問題であるコイル巻き直し組合せを自動化し、30コイルの組合せが5分以内で実行できるようになるとともに、巻き直し設備における歩留りが向上した。
- (2) 従来の手法では困難とされていた熟練操業者の発見的な組合せのノウハウが、エキスパートシステムを用いれば容易にシステム化できた。
- (3) ワークステーションを使用したプロトタイプングアプローチは、段階的なシステム構築に有用であり、不完全な知識から出発してもシミュレーションを通じて知識の追加と変更をすることにより、稼動前に完全な知識ベースを作成できた。
- (4) P/Cでの安全性や実行処理速度の面ではまだ改善の余地があるものの、エキスパートシステムは、試行錯誤的なアプローチが要求されるシステム開発に適する。

本エキスパートシステムは、1990年3月のライン営業運転以来オペレータの介入なく順調に稼働しており、巻き直し設備の歩留りと操業能率の向上に大きく寄与している。今後、エキスパートシステムは、ますます熟練操業者のノウハウをシステム化するための有効なツールになることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 穴吹善範, 尾脇林太郎, 中路 茂, 崎山英昭, 片江隆行: 「電磁鋼板精整ラインの自動搬送エキスパートシステム」, 川崎製鉄技報, 23 (1991) 3, 239
- 2) 小六正修, 山中止志郎, 吉村紀久雄, 田村智一: 日立評論, 72 (1990) 11, 1-8
- 3) 浜崎孝志, 亀田達也, 奥出 聡, 小六正修, 小塚 潔: 日立評論, 72 (1990) 11, 41-46
- 4) 寺野隆雄: 計測と制御, 27 (1988) 10, 11-16
- 5) S. Tano: "EUREKA-II: A Programming Tool for Knowledge-Based Real Time Control Systems", Preprints of IEEE Int. Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, Hitachi (Japan), (1988)
- 6) 上野晴樹: 「知識工学入門」, (1986), 71-73, [オーム社]