
冷間タンデムミル板厚精度診断エキスパートシステム

An Expert System for Diagnosis of Strip Thickness Accuracy in Cold Rolling Tandem Mill

井口 弘明(Hiroaki Iguchi) 北尾 斉治(Nariharu Kitao) 佐能 克明(Katsuaki Sanou)
入月 克巳(Katsumi Iritsuki) 唐澤 直樹(Naoki Karasawa) 小松 富夫(Tomio Komatsu)

要旨：

品質精度の保証と、制御システムの保全支援を目的に、完全連続冷間タンデム圧延機の板厚精度の異常を検出して、板厚制御系（AGC）と油圧压下制御系を対象にその原因を推定するリアルタイムエキスパートシステムを構築した。本システムは設備診断装置とPLC（programmable logic controller）の情報から推論用データを編集し、高速定常圧延中と圧延完了時点の2回、当該コイルの異常判定と異常要因の推論を行う。従来の手続き型手法と知識ベースシステムを組み合わせで構成した。本システムは通常の設定状態監視と異常発生時の保全情報の提供に効果を発揮している。

Synopsis：

Kawasaki Steel has developed an on-line real time expert system in fully continuous tandem cold rolling mill. The expert system detects anomaly of strip thickness accuracy and infers its reason immediately for automatic gauge control system and hydraulic pushup roll gap control system. The purposes of this system are to assure the quality of cold rolled products and support maintenance work of the mill control system. This system forms data based on the information of the equipment diagnosis system and mill control PLC (programmable logic controller), and executes inference at two rolling points, an intermediary point of top speed and a shear cut point of the object coil. The expert system is composed of an associating knowledge base system with conventional procedure programmed system. This system has contributed to the continuous diagnosis of equipment conditions and trouble-shooting guidance.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

An Expert System for Diagnosis of Strip Thickness Accuracy in Cold Rolling Tandem Mill



井口 弘明
Hiroaki Iguchi

千葉製鉄所 設備技術
部電気計装技術室 主
査(掛長)



北尾 斉治
Nariharu Kitao

千葉製鉄所 設備技術
部電気計装技術室 主
査(部長)



佐能 克明
Katsuaki Sanou

システム部付 掛長



入月 克巳
Katsumi Iritsuki

システム部システム研
究室



唐澤 直樹
Naoki Karasawa

川鉄システム開発(株)
第2事業本部東京事業
所第2システム開発グ
ループ



小松 富夫
Tomio Komatsu

千葉製鉄所 第2冷間
圧延部冷間圧延課長

1 緒 言

鉄鋼業における診断型エキスパートシステム開発事例は多いが、圧延機を対象にした、高応答を要求されるオンラインシステムへの適用事例は極めて少ない。このたび、当社千葉製鉄所2冷間圧延工場第3冷間圧延(No. 3 TCM—tandem cold mill)において、冷間タンデムミル板厚精度診断エキスパートシステムを構築した¹⁾。

本システムは、タンデムミルの自動板厚制御(AGC—automatic gauge control)機能を主対象として、板厚に異常が発生したことを早期に検出し、該当冷延コイルの圧延情報を分析して異常発生の原因を推定し、オペレータへガイダンスをするオンラインシステムである。

本システムは、千葉製鉄所冷延工場の複数生産ラインの包括的プロセスコンピュータシステム²⁾(CANS—cold autonomous network system)の統括系上で推論部を動作させる知識ベースシステムである。構築ツールとして EUREKA (electronic understanding and

要旨

品質精度の保証と、制御システムの保全支援を目的に、完全連続冷間タンデム圧延機の板厚精度の異常を検出して、板厚制御系(AGC)と油圧压下制御系を対象にその要因を推定するリアルタイムエキスパートシステムを構築した。

本システムは設備診断装置と PLC (programmable logic controller) の情報から推論用データを編集し、高速定常圧延中と圧延完了時点の2回、当該コイルの異常判定と異常要因の推論を行う。従来の手続き型手法と知識ベースシステムを組み合わせで構成した。

本システムは通常の設備状態監視と異常発生時の保全情報の提供に効果を発揮している。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed an on-line real time expert system in fully continuous tandem cold rolling mill. The expert system detects anomaly of strip thickness accuracy and infers its reason immediately for automatic gauge control system and hydraulic push-up roll gap control system. The purposes of this system are to assure the quality of cold rolled products and support maintenance work of the mill control system.

This system forms data based on the information of the equipment diagnosis system and mill control PLC (programmable logic controller), and executes inference at two rolling points, an intermediary point of top speed and a shear cut point of the object coil. The expert system is composed of an associating knowledge base system with conventional procedure programmed system.

This system has contributed to the continuous diagnosis of equipment conditions and trouble-shooting guidance.

reasoning action by knowledge action, 日立製作所製)を使用した。統括系上の知識ベースシステム本体のほか、推論用データの収集・編集を圧延機制御用のプロセスコンピュータ上で行い、プロセスデータの一時情報収集と高速なデータ加工を圧延機制御用の高速 PLC (programmable logic controller) で行う。

開発に際してプロトタイプ構築を行い設計方針を定め、各階層の制御用計算機に機能を分担して実時間処理を実現した。

2 システムの概要

2.1 システム開発の目的

冷延鋼板の品質精度に対する要求の厳格化のために、最新の冷延ミル AGC は多くの制御機能を備えた複雑な構成となっている。圧延機の連続化、高速化も進み、AGC に異常が発生した場合には、圧延コイルを不良にする危険があるとともに、制御系が複雑な構成

* 平成3年7月3日原稿受付

であるために AGC の異常箇所、要因の究明に時間を要し、生産の阻害を拡大してしまう懸念がある。

No. 3 TCM は、自動車用鋼板をはじめとする厚物材主体の完全連続冷間圧延機である。圧延材が厚いので重量あたりのコイル長が短くなり、コイルの溶接頻度と溶接点圧延機通過時の減速に伴う圧延速度の変更頻度が高い。板厚制御装置の能力が生産効率と操業の安定に大きく影響する。

本システムを開発した目的は、板厚精度の異常発生を検出し、該当圧延コイルの操業・設備情報をリアルタイムに分析して異常発生の真の要因推定を行い、適切にオペレータへ指示するシステムを構築することによって、障害増大の防止、迅速な復旧をはかり、少数の操業・保全要員で安定した生産を維持することを支援することにある。

さらに計算機技術の面から見れば、診断型エキスパートシステムをオンラインでリアルタイムに動作させること、エキスパートシステムが持つ保守の容易性を活用すること、また開発にプロトタイプ手法（他計算機、別言語で事前評価を行い、後に実システムへ移植する）を採用し、プロトタイプに対する知見の蓄積を行うこと、診断型エキスパートシステムの知識抽出・整理のノウハウを得ること等の意味がある。

2.2 No. 3 TCM の AGC 構成

No. 3 TCM の AGC 構成を Fig. 1 に示す。主要な AGC ループは①BISRA、②1 スタンド圧下モニター、③ロール偏心制御、④2 スタンド速度 FF、⑤4 スタンド速度 FF および⑥出側速度である。アクチュエータとして、1 スタンドの圧下制御系に高速油圧圧下装置、全スタンドの速度制御系にデジタル自動速度制御 (D-ASR—digital automatic speed regulator) を備えている。

本システムは板厚不良発生の要因推定を、主要 AGC と 1 スタ

ンドの高速油圧圧下装置を対象範囲にして実施している。

圧延機出側の板厚偏差信号を一定の圧延速度条件で周波数解析して、各スタンドのロール偏心等が板厚の変動に及ぼす影響を特定することはよく行われる。No. 3 TCM には毎コイルに対して高速かつ一定な速度領域で板厚偏差の周波数解析を自動で行い、操業情報とする機能がある。本エキスパートシステムは、板厚不良の要因特定にこの周波数解析結果を使用している。

板厚変動の抑制を周波数領域の観点からみると、各 AGC の動作原理から板厚変動を抑制可能な周波数帯域が限定される、この各 AGC で抑制可能な板厚変動の周波数帯域という考え方は、要因特定を行ううえで重要なポイントである。Fig. 2 に板厚偏差信号の周波数解析結果の例と、AGC で抑制可能な板厚変動の周波数帯域を示す。

2.3 システム構成と開発手順

本エキスパートシステムに関連する部分のシステム構成の概要を Fig. 3 に示す。

推論部本体は、冷延薄板プロコンシステムの統括プロコン開発系上で動作させる。推論用データの編集は No. 3 TCM サテライトプロコンで行う。実プロセスデータの収集は圧延機制御 PLC および設備診断装置で行う。

また今回プロトタイプを開発して事前に検証を行った。これはエキスパートシステム構築ツール ART (automated reasoning tool, Inference 社製) を使用して、開発用ワークステーション上で実施した。

プロトタイプ ART から実働システム EUREKA への移行に際して、いったん独立した EUREKA 用のワークステーション上で移行と拡張および検証を行い、次いで上記の統括プロコン開発系で最終的に動作させた。

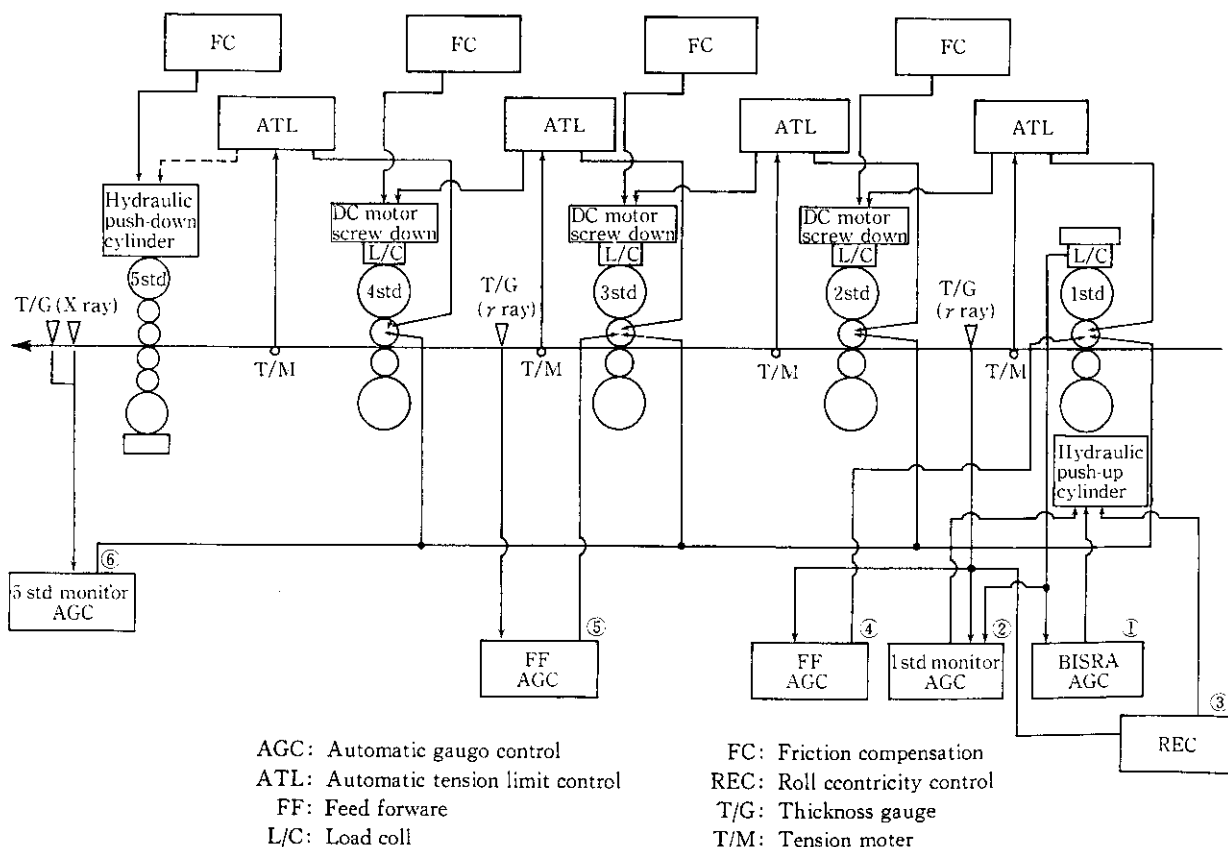


Fig. 1 Schematic diagram of AGC system

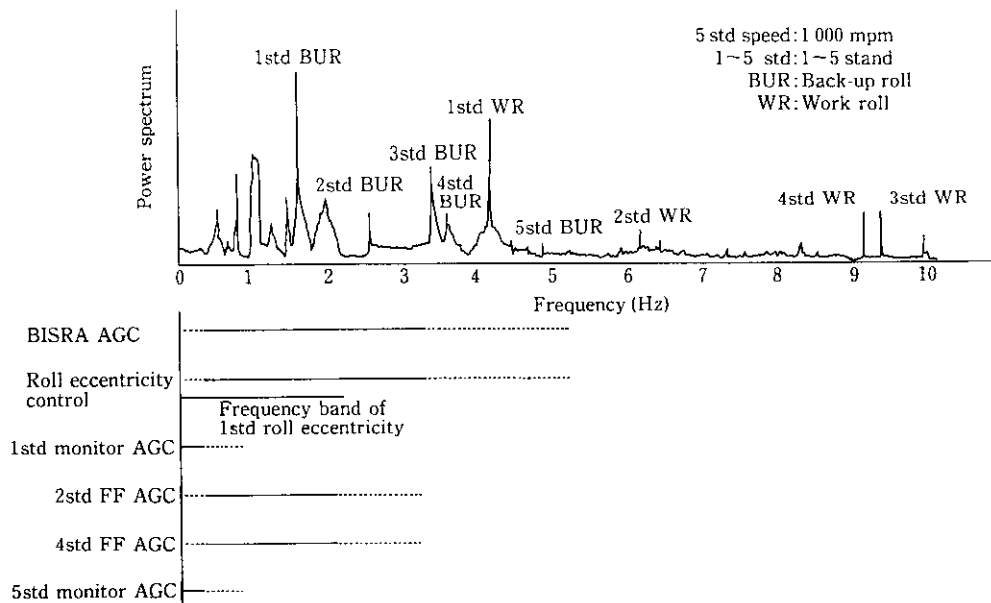


Fig. 2 An example of FFT of gauge deviation signal and an available frequency of AGC

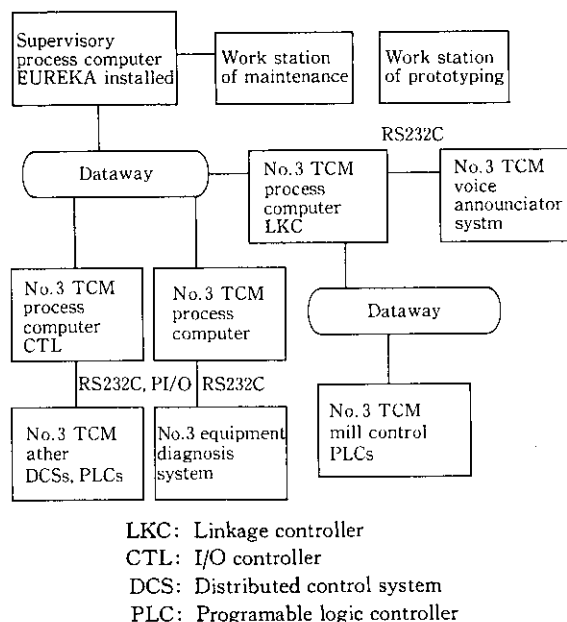


Fig. 3 System configuration of expert system

3 エキスパートシステム構築の考え方

3.1 要因推定の考え方

板厚精度の異常を検出して、その要因を特定する基本的な考え方は、(1)プロセスデータを収集する、(2)圧延機出側の板厚偏差信号の周波数解析演算とそれによるロール偏芯成分の評価結果をもとにして異常の可能性のある(1つとは限らない)AGCを特定する、(3)各種プロセスデータを調査してAGCごとに異常要因を絞ることである。

Fig. 4に知識ベースの構造を示す。推論用のデータを受信して推論処理部へ設定する部分と、板厚不良を生じた要因を特定する不

良要因診断部が大別した。不良要因診断部を二つのサブシステムから構成し、さらに各サブシステムを複数のルール群により構成している。この構造を採用した理由は次のとおりである。

3.1.1 起動のタイミング

完全連続冷間圧延機の運転状態を圧延速度からみた場合には、コイルの溶接点あるいは特異点が圧延機を通過する前後あるいは走間板厚変更点での低速圧延域と、通常大半の圧延を行う高速かつ定常的な圧延域と、高速圧延と低速圧延の間の過渡的な加速・減速中の圧延域、以上三つの圧延領域から構成される周期的な運転を繰り返している。No. 3 TCMには、高速定常圧延域の先頭部で1, 2スタンド間と圧延機出側に設置した各板厚計からの板厚偏差信号を周波数解析して、各スタンドのロール偏芯成分が板厚精度に及ぼす影響を毎コイル圧延中自動的に特定する装置を設備診断機能の一環として備え、この解析結果を操業情報の一部としている。

不良要因診断システムは、この板厚偏差信号の周波数解析結果を推論のための情報として使用している。これとは別個に推論用の情報に使用することのみを目的として、コイル全長に対し定周期で圧延時の特定情報を収集することも行う。

推論用情報の収集タイミングによって、推論部を次の二つのサブシステムに分割して構成した。

(1) 解析完了時要因推定サブシステム

圧延状態が高速定常に移行した先頭での板厚偏差信号の周波数解析が終了した時点で起動し、主にロール偏芯に関する異常要因を推定する。

(2) 圧延終了時要因推定サブシステム

1コイルの圧延が終了した時点で起動し、当該コイル全体について異常要因を推定する。

Fig. 5に推論の起動タイミングを示す。

3.1.2 ルールのグルーピング

推論上のまとまりをもったある単位でルールをグルーピングすることにより、ルールの構造化やメンテナンス性の向上をはかる。グルーピングは知識提供者(複数)の思考過程に基づき、AGCシステムの構成や圧延コイルの各部分(top部, middle部, end部)を単位として行ったものである。

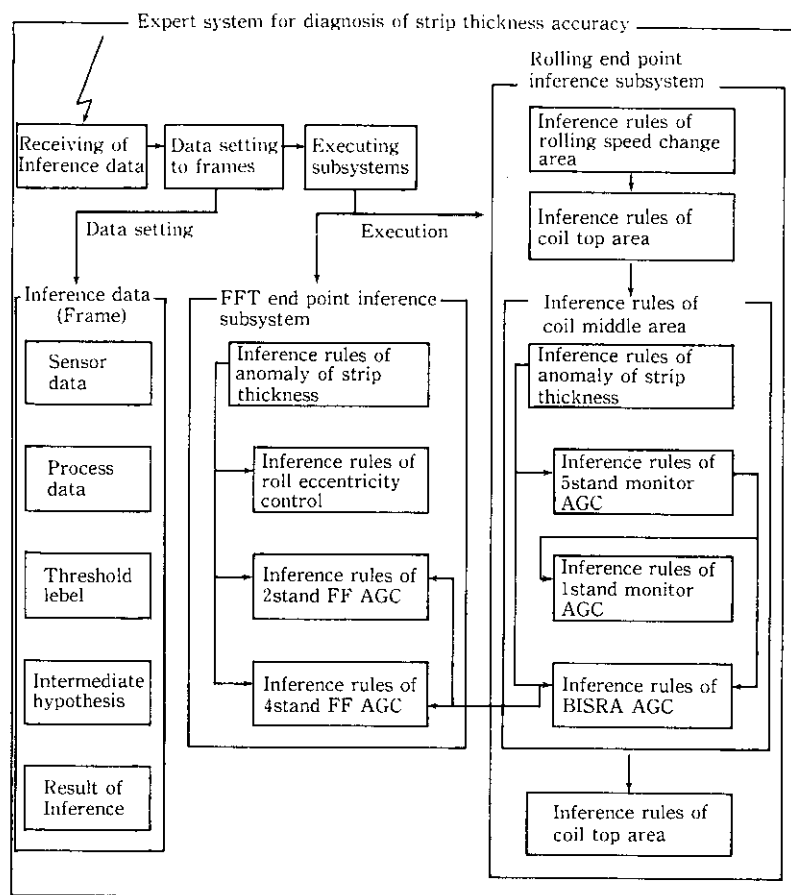


Fig. 4 Constitution of knowledge base

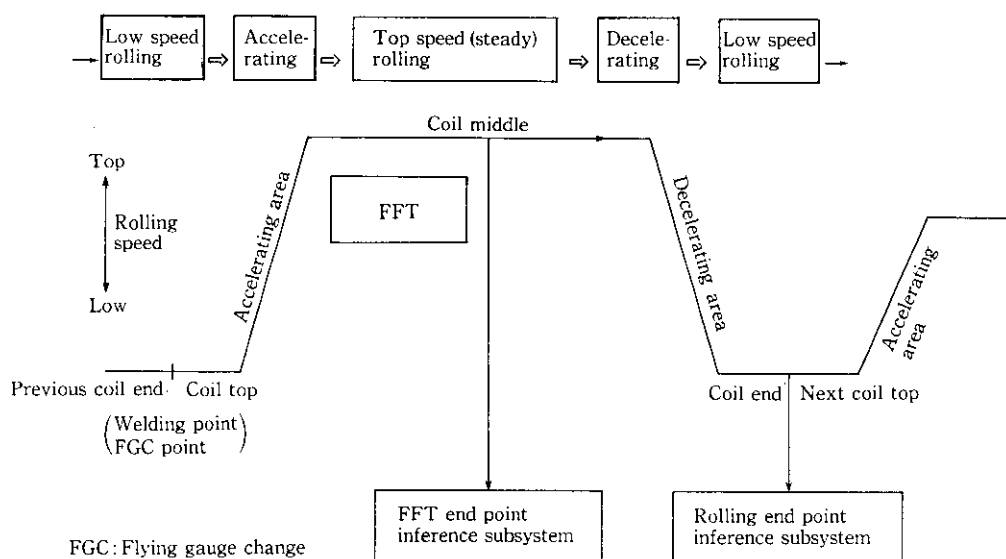


Fig. 5 Execution point of inference

3.2 要因推定の進め方

板厚不良の要因推定の特徴は、「本来は、その板厚変動を抑制するはずの AGC に不具合が発生している」という仮説をたてるところにある。仮説をたてて推論を進めていく考え方を、圧延完了時の要因推定処理の一部分を例にして次に説明する。

3.2.1 板厚偏差の判定

圧延機出側板厚偏差がある許容値を超えている場合には、以下の事象に着目する。

- (1) 圧延機出側板厚偏差にオフセットがあるか。
- (2) 圧延機出側板厚偏差にうねり (0.2 Hz 以下の周波数帯域の異常) があるか。

- (3) 周波数解析結果で 0.2~3 Hz の周波数帯域に異常があるか (3 Hz 以上の周波数帯域の板厚変動は、AGC の抑制能力の範囲外である)。

3.2.2 オフセットとうねりの判定

オフセットとうねりの判定は、ゲージクラシファイ結果を利用し、クラシファイ結果が+あるいは一方とにも広く分布し、+方向、一方とにもほぼ等しい分布を示していればうねりであり、+あるいは一方の一方にかたよった分布であればオフセットと判定する。

- (1) オフセットは、圧延スケジュールが正しいとの前提のもとでは、本来は出側速度 AGC によって抑制されているはずである。したがって、圧延機出側板厚偏差にオフセットがある場合には、出側速度 AGC は機能を果たしていない。
- (2) 圧延機出側板厚偏差にオフセットがある場合には、さらに次の事象に着目する。
- ① 1 スタンド出側板厚偏差オフセットがあるか。
 - ② 1 スタンド出側板厚偏差にうねり (0.2 Hz 以下の周波数帯域の異常) があるか。
- (3) 上記①、②のオフセットとうねりは、本来 1 スタンド圧下モニター AGC によって抑制されるべきである。したがって 1 スタンド出側板厚偏差にオフセットまたはうねりがある場合は、1 スタンド圧下モニター AGC が機能を果たしていない。
- (4) この場合に、オペレータの手動介入が介在していれば、圧延スケジュールに許容できない誤差が生じ、運転担当者が介入して圧延状態を修正した可能性がある。
- (5) 1 スタンド出側板厚偏差の 0.2~3 Hz の周波数帯域に異常があれば、それは圧延機出側板厚偏差の 0.2~3 Hz の周波数帯域の異常として検出されるはずであり、3.2.1 の(3)の推論実行時にその異常要因の推定を行うはずである。

4 開発方法

4.1 プロトタイプ作成

板厚不良要因推定サブシステムの開発において、開発用計算機を使用して定常圧延部分のプロトタイプを作成、検証したのちに、それを実働環境へ移植し、非定常圧延部分を追加してシステムを拡張するという手順をとった。これは次の理由による。

- (1) 計測・制御分野における診断問題へのエキスパートシステム適用は開発当時担当者らにとって初めての試みであり、一気に全体システムを構築するのではなく、高速定常圧延時の板厚不良要因診断部分を初めに構築して検証を行う方法を選択した。
- (2) ある開発環境から、別の実働環境へのプログラム変更を含む移行を行い、ノウハウを蓄積する。

プロトタイプの開発環境と No. 3 TCM での実働環境は次のとおりである。

開発環境: Symbolics 3620/ART (Lisp で記述)

実働環境: 日立 2050/EUREKA (C 言語で記述)

4.2 実機への移行

実機への移行において、要因推定範囲の拡大および知識ベースの再構築を行った。

4.2.1 要因推定範囲の拡大

プロトタイプは定常圧延部分の範囲を対象としたものである。実働環境への移植に際して、非定常圧延部分を追加してシステムを拡

張した。定常圧延部分と非定常圧延部分の関係については、Fig. 4 の知識ベースの構造に示す。

4.2.2 知識ベースの再構築

プロトタイプは ART を使用して構築しており、ART から EU REKA への変換を実施した。

4.3 オンラインチューニング

知識ベースのルールをチューニングするために、次の特徴を有するチューニング機能を用意した。

- (1) データウェイを介して伝送される推論用データを保持し、それを用いて推論過程の再現テストを行うことができる。
- (2) 再現テスト時に推論用のデータを人間に分かりやすい形で提示する。
- (3) 再現テスト時に推論過程、すなわちルールの連鎖を把握することができる。

5 適用結果

5.1 テストデータでの動作確認

実機への移行作業を行ったのちに、テストデータを使用して本システムの動作確認テストを行った。実システム上での単体テスト時の処理時間、CPU 負荷を Table 1 に示す。

Table 1 Response time and CPU load

Case	Rule number	Result number	Response (s)	CPU load (%)
I (FFT)	25	11	2.360	24
II (Rolling)	41	20	2.699	28

5.2 プロトタイプ手法の評価

今回の開発においては、部分問題を切り出してプロトタイプを構築するアプローチを採用した。これによりシステムの性格の見極めを行い、データ駆動型推論方式の問題解決への適用と、不良要因をいくつかの可能性に切り分けて絞り込んでいくという基本形態の採用を決定し、あわせて事前評価を実施した。

5.3 計算機の機能分担

推論用データの編集について各計算機間の機能の分担を Table 2 にまとめ、推論に伴う処理のフローを Fig. 6 に示す。

ミル制御 PLC および設備診断装置で一次データの収集、加工と判定を高速 (数 ms~数 10 ms) かつ連続に行う。ミル制御 PLC は主に圧延機の運転制御に密接した情報 (例えば AGC の PI 制御ループで積分項の飽和を生じた、あるいは AGC の制御出力が上下限值に達したことにより出力を規制した等の情報) の判定を行う。PLC は高速で処理演算を実施する必要があることと、一般的にプログラム機能が上位計算機に比べて低いこともあり、判定用の基準値を直接プログラム中に比較命令の形で組み込んである。

設備診断装置は、板厚偏差信号の周波数解析演算とロール偏芯周波数成分の特定、板厚偏差信号のクラス分けおよび 1 スタンドの油圧圧下装置の機能監視を実施する。

No. 3 TCM ブロックでは 500~800 ms 程度の周期で 1 コイル全域にわたり推論用のデータ収集と編集を行う。判定用の基準値をテ

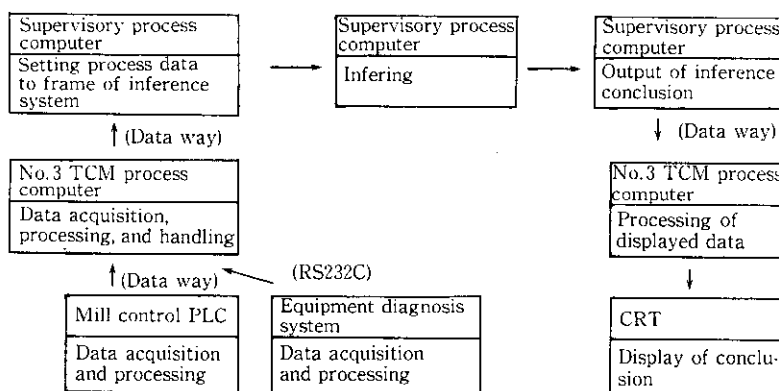


Fig. 6 Flow diagram of inference procedure

Table 2 No. 3 TCM control CPU constitution and functions of inference procedure

Class	CPU	Functions (Program Language)
I	Mill control PLC	High speed data acquisition (20~30 ms period) • First determination of anomaly (POL*)
	Equipment diagnosis system	Data acquisition and processing • FFT of gauge deviation signal and determination of roll eccentricity • Gauge classify • Diagnosis of 1 stand hydraulic push-up roll gap control system (FORTRAN)
II	No. 3 TCM process computer	Constant period data acquisition • Acquisition of full longitudinal rolling data (FORTRAN)
III	Supervisory process computer	Data interface between inference system and conventional control system (C)
		Inference procedure (EUREKA, C*)

*1 Problem oriented language

*2 Used for user definition function

ープル上に持ち、オンラインでの基準値変更が容易である。

統括プロコン開発系では、推論部本体と周辺アプリケーションソフトの二つの処理部がある。推論部本体は EUREKA 本体とユーザ定義関数（言語 C）からなる。ユーザ定義関数は必要な数値演算処理を行うためのものである。周辺のアプリケーションソフトは、推論用のデータを EUREKA のフレーム上に展開してセットするものが主である。

推論結果は No. 3 TCM プロコンの CRT に表示する。1 要因を 1 行に表示する方式であり、現在のところ推論結果の要因数は 117 である。CRT 出力例を Fig. 7 に示す。

5.4 異常検出例

オンラインでの異常検出例を Fig. 8 に示す。これは圧延サイクル変更後の 1 コイル目の圧延データである。サイクル変更時にはワーク・バックアップのロール相互を接触させて停止・保持するタイミングがあり、熱的要因によるロール偏芯に起因した板厚変動を生じることがある。ここに示す検出例は、検証を目的に条件を設定してデータを収集したなかの一例である。最終的板厚精度は基準内にある。

6 評価

本システムにおける知識ベースの適用に対する評価は以下のとおりである。

6.1 応答性

実運用状態においてシステム全体の応答時間は 8 秒以内である。単体テスト時には 3 秒以内の応答時間であったので、実運用において処理時間が増大している。ガイダンスを目的とする本システムでは実用上の問題はない。板厚精度診断に機能を限定した開発であり、知識ベースシステムとして高速化を実現できた³⁾。応答時間は使用する計算機の能力に依存するものの、やはり知識ベースシステムは処理の負荷が高いといえる。

6.2 開発性

本システムは、比較的小規模ではあるが、推論の対象としては複雑である。少人数で知識ベースの構築を進めたので作業効率の点では高かったが、開発に際してまず知識の収集整理に時間を要した。後半では、システムを試行しつつ推論処理のレベルを高める作業が主体となる。今回のように開発手順に試行的な性格を有するシステムに対し、従来の手続き型のプログラム手法との開発効率の比較を行うことは難しいが、従来システムに対して知識ベースシステムの持つ、体系的な可読性の高さと、変更および機能検証の容易性という

*** 4T ソフトウェアシステム インフォメーション サイト ***				88-12-19 17:50:55
				PRGE. 1
2007/12/07 10:11:12	NO 1234	114151	345TD かん 345TD かん	345TD かん 345TD かん
2007/12/07 10:11:12	NO 1234	11414	FF4RGC タイミングソフト	FF4RGC タイミングソフト

Fig. 7 An example of operator guidance message on CRT display of expert system

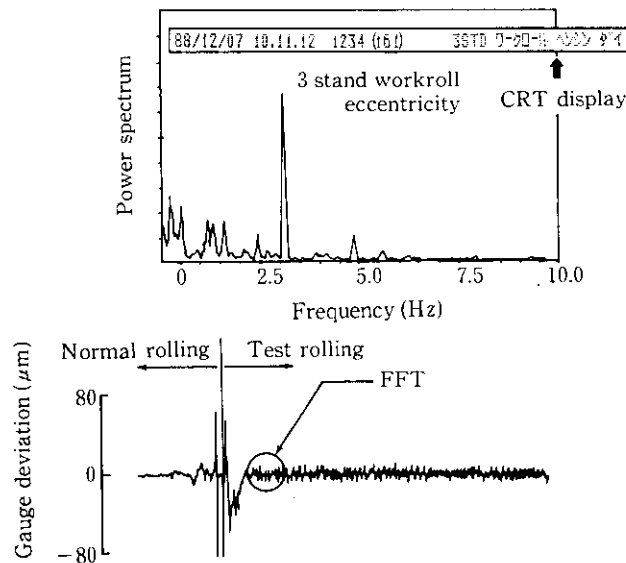


Fig. 8 A detection example of anomaly of strip thickness accuracy

利点が、かなりの効果を上げたと考える。

6.3 知識ベースのオンライン化

知識ベースをオンラインシステム上に構築して、人間系を介在させずに動作させる場合には、入力である推論用情報と、出力である推論結果のインターフェース部を従来システムの範囲で構成しなければならない。この部分に変更を行う場合には対になる知識ベースにも変更が必要となる。この変更頻度が高いと開発負荷が大きくなり望ましくない。本システムは、PLC等で演算加工して生成する推論用の一次情報の範囲と、ガイダンスすべき推論結果の項目を早期に確定できた。これによって試行的な開発作業を知識ベースの範囲内に限定して、知識ベースの利点を活用することができた。

7 結 言

千葉製鉄所 2 冷間圧延工場 No. 3 TCM において冷間タンデムミル板厚精度診断エキスパートシステムを開発した。本システムは圧延機の AGC システム、油圧圧下装置を主な診断対象とし、板厚不良の発生を検出し、その要因推定を行うオンラインリアルタイムシステムである。

開発に際してはプロトタイプ手法を採用した。実システムでは操業データを高速で収集・加工・編集し、リアルタイムに推論処理を実行する必要から、機能を分散した構成として、実運用状態で 8 秒以内の応答性能を実現した。

開発時点の試行的なレベルアップの過程で、知識ベースシステムの利点を活かした。知識を体系的かつ可読性に優れた形に整理できた効果も大きい。

今後、さらに要因推定の深化と、診断対象の拡大をはかって行きたい。

参 考 文 献

- 1) 新井慎也: 「圧延プロセスにおける異常要因推定エキスパートシステムの概要」, 人工知能学会全国大会 (第 3 回) 論文集, 11-7, (1989), 549-552
- 2) 齊川夏樹, 森 淳, 横田広幸, 吉永茂樹, 柄沢正明, 平瀬幸一: 「冷延工場プロセスコンピュータへの自律分散システムの適用」, 材料とプロセス, 1 (1988) 2, 592
- 3) 元松廣議, 前川健二, 蔵田喜輝: 「冷間圧延機の最適生産・保全のための監視診断システム」, 日本設備管理学会春季研究発表大会論文集, (1991), 19-23