
熱間圧延設備における診断技術の開発

Development of Diagnosis Techniques in Hot Strip Mill

高木 清(Kiyoshi Takagi) 堀田 悠生(Hisao Hotta) 綿貫 正典(Masanori Watanuki)
井上 紀明(Noriaki Inoue) 花田 敏博(Toshihiro Hanada) 松村 昭彦(Akihiko
Matsumura)

要旨：

千葉および水島両製鉄所の熱延工場で、設備故障の防止や設備性能保証を目的として、ミルライン全域にわたって設備診断技術の開発を行ってきた。主な診断技術は、(1)サイジングプレス制御系、機械系を診断するプレス制御および軸受診断技術、(2)クラウン制御ミルの圧下設備の剛性異常を診断する圧延機剛性異常診断技術、(3)コイラー段差回避動作から応答性、精度を診断するコイラー段差回避動作および機械精度診断技術、等から成り立っており、熱延ラインのリフレッシュに合わせて段階的に開発、適用している。この結果、設備制度、制御応答性悪化による圧延作業率低下の抑制、品質大量不具合発生防止および長時間設備故障の発生防止に寄与している。

Synopsis：

Kawasaki Steel Corp. has developed the diagnostic techniques for the purpose of the failure prediction and performance assurance of device in hot strip mill of Chiba and Mizushima Works. Main diagnostic techniques are (1) performance diagnosis and diagnosis of bearing by AE method with sizing press, which predicts the irregular movement caused by the slow response of control system and the increase of mechanical friction, (2) diagnosis of mill spring's abnormality which observes the difference of mill spring occurred by the low stiffness of screw down device with high-crown mill, and (3) performance diagnosis and alignment diagnosis of AJC which makes a diagnosis of the response time accuracy and the jumping height accuracy with AJC coiler. Since these diagnostic techniques were applied, they have contributed to the prevention of miss rolling, inferior goods and downtime by the slow response of control system and the bad accuracy of equipment.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Development of Diagnosis Techniques in Hot Strip Mill

要旨

千葉および水島両製鉄所の熱延工場で、設備故障の防止や設備性能保証を目的として、ミルライン全域にわたって設備診断技術の開発を行ってきた。主な診断技術は、(1) サイジングプレス制御系、機械系を診断するプレス制御および軸受診断技術、(2) クラウン制御ミルの圧下設備の剛性異常を診断する圧延機剛性異常診断技術、(3) コイラー段差回避動作から応答性、精度を診断するコイラー段差回避動作および機械精度診断技術、等から成り立っており、熱延ラインのリフレッシュに合わせて段階的に開発、適用している。この結果、設備精度、制御応答性悪化による圧延作業率低下の抑制、品質大量不具合発生防止および長時間設備故障の発生防止に寄与している。

Synopsis :

Kawasaki Steel Corp. has developed the diagnostic techniques for the purpose of the failure prediction and performance assurance of device in hot strip mill of Chiba and Mizushima Works. Main diagnostic techniques are (1) performance diagnosis and diagnosis of bearing by AE method with sizing press, which predicts the irregular movement caused by the slow response of control system and the increase of mechanical friction, (2) diagnosis of mill spring's abnormality which observes the difference of mill spring occurred by the low stiffness of screw down device with high-crown mill, and (3) performance diagnosis and alignment diagnosis of AJC which makes a diagnosis of the response time accuracy and the jumping height accuracy with AJC coiler. Since these diagnostic techniques were applied, they have contributed to the prevention of miss rolling, inferior goods and downtime by the slow response of control system and the bad accuracy of equipment.



高木 清
Kiyoshi Takagi
水島製鉄所 設備部設備技術室 主査(掛長)



堀田 悠生
Hisao Hotta
水島製鉄所 設備部設備技術室 主査(部長補)



綿貫 正典
Masanori Watanuki
千葉製鉄所 保全部保全技術室 主査(課長)



井上 紀明
Noriaki Inoue
水島製鉄所 設備部設備技術室 主査(課長補)



花田 敏博
Toshihiro Hanada
水島製鉄所 電気・計装部電気・計装技術室 主査(掛長)



松村 昭彦
Akihiko Matsumura
千葉製鉄所 保全部保全技術室

1 緒 言

熱間圧延工場は大量生産工場として高能率の生産を追求し、連铸工場との同期化をはじめとする合理化の推進、さらに高品質を追求した設備のリフレッシュを次々に行っており、ライン全体としてますます高度化した複雑な設備となってきた。

熱間圧延工場の長時間の操業停止は、前工程の製鉄、製鋼工場および後工程の冷延工場に重大な影響を与える。また品質上の不具合も冷延工場の操業不安定の大きな要因となる。したがって、熱間圧延工場の操業安定は製鉄所全体の安定生産にとって不可欠な条件である。

以上のような背景の中で熱間圧延工場の設備保全は、長時間故障の防止、品質不良の防止、さらに操業の安定化にとって重要な設備精度や制御のレベル低下の防止を重点に進めており、そのための設備診断技術を段階的に開発あるいは適用してきている。ここでは、サイジングプレス (HARP)、圧延機、ホットランテーブルおよびコイラーに開発適用した熱間圧延工場特有の診断技術を紹介する。

2 診断技術の適用状況と特徴

当社の熱延工場は、操業の同期化をねらって開発導入したサイジングプレス¹⁾、6 Hi 圧延機 (HC—high crown—ミル) や、高品質化に対応したテーパ付ワークロールソフトミル²⁾ (K-WRS ミル)、ブロッカーロール段差回避制御コイラー (AJC—automatic jumping control—コイラー) および加熱炉のウォーキングビーム化等、加熱炉からコイラーまでライン全長にわたって設備の大幅なリフレッシュを行い、品質とコスト競争力の向上を図ってきた。

診断技術は、これらリフレッシュ設備の新機能を保証するために開発適用を図っており、連続铸造工場と熱間圧延工場の生産プロセスの同期化操業³⁾ 実現のために、設備故障の防止を主目的とするものと、高寸法精度の品質を作り込むための設備性能の維持を主目的とするものと二つに分けられる。Fig. 1 に千葉、水島両製鉄所で開発適用した代表的な診断技術項目を示し、Table 1 に適用予定を含めた診断技術項目を目的別、測定機器別に区分して示す。

* 平成2年2月23日原稿受付

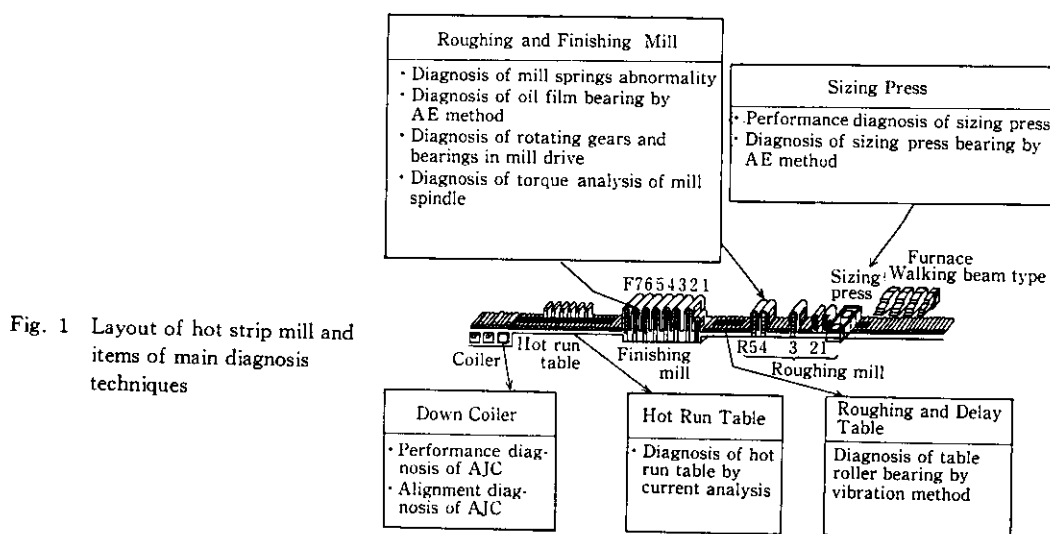


Fig. 1 Layout of hot strip mill and items of main diagnosis techniques

Table 1 Purpose of diagnosis in hot strip mill and its measurement techniques

		Purpose		Instrument							
		For failure prediction	For performance assurance	Vibration	AE	Torque	Displacement	Load cell	Temperature	Ampere	Others
Furnace			Heat efficient								
			Press control						△		
Sizing press											◎
				○							
Mill	Drive device				◎						
						○					
					○						
				○							
											△
	Screw down device		Mill spring					◎			
			Response of Jack				□				
	Others		Alignment				△				
			Looper response								□
Table		Bearing	• Roller	○							
			• Roller level							◎	
			• Coupling								
Down coiler			• Nozzle						△		
			• Servo value				◎				
			• Hyd cylinder								
Utility											◎
							○				
							○				

◎ using in KSC (described in this report) ○ using in KSC □ preparing to use △ planning

熱延分野の設備診断技術の全体的な特徴は以下のとおりである。

- (1) 診断技術の対象設備として、サイジングプレス、圧延機、コイラー、テーブル等、ライン全体を通して診断技術を開発適用している。
- (2) 従来から開発された制御精度の診断は言うに及ばず、機械精度の診断を含めて、機械、制御一体の診断技術である。
- (3) 診断技術の基本となる測定機器は、振動法を含め数種のセンサーの適用を図っている。

以下に主要診断技術の概要と特徴を説明する。

サイジングプレスは、世界に先がけて当社で開発されたプレス方式のスラブ幅圧下設備であり、次のような信頼性に大きく影響する特徴を有する。

- (1) 短時間（約 1.4 秒）に、スラブ幅圧下、幅調整およびスラブ搬送の 1 サイクルが完了し、1 スラブ当たり約 30 回繰り返す。
- (2) 幅圧下機構は、偏芯軸による往復機構で、偏芯軸受には過大な荷重が作用する。

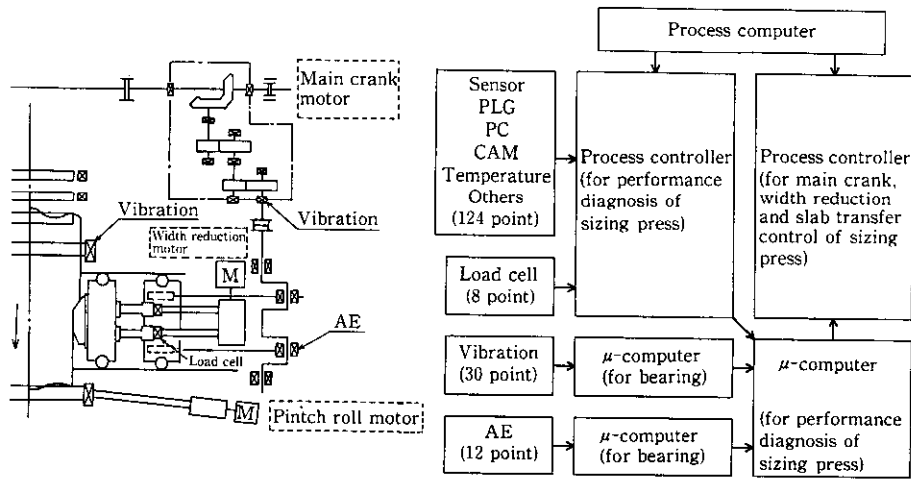


Fig. 2 Concept of sizing press performance diagnosis system

したがって、電気制御系の不調や機械装置往復機構部の摩擦力増加により、各動作が同調しなくなった場合、各装置が機械的に干渉し異常な負荷が作用し、破損につながる。一方偏心軸受で過大な荷重を支えるころがり軸受の異常を予知することが極めて重要である。このために、電気制御系の応答性、機械装置の摩擦力、ころがり軸受の金属疲労による劣化を監視し、異常徴候を早期に予知する診断技術を開発した。Fig. 2 にサイジングプレス診断技術の構成を示す。

圧延機に関しては、自社開発の K-WRS ミルや HC ミル⁴⁾の導入が行われ、クラウン制御ミルへリフレッシュされている。クラウン制御ミルでは、板クラウン（板の断面での板幅中央と板端との板厚差）は、デットフラット（クラウン零）をねらって圧延するために、板クラウンの大きい場合にくらべて圧延材の蛇行が発生しやすくなる。また従来の圧延機に比べて、ロールクロス、ロールオフセンター、ミル定数に悪影響をおよぼしやすい複雑な装置が付加されており、高度の操作技術が必要となっている。したがって、圧延機に対しては、主に圧下装置の剛性の低下により発生する圧延機作業側（OP 側）と、駆動側（DR 側）とのミル定数差を監視し、設備精度悪化部位を診断する圧延機剛性異常診断技術を開発している。その他、アコースティックエミッション（AE）による控ロール軸受診断⁵⁾、振動法による主駆動装置軸受診断も開発導入している。Fig. 3 に圧延機全体の診断技術の構成を示す。

仕上圧延機の後方には、鋼板の材質を制御する冷却設備⁶⁾と、多数のローラー（約 450 本）を有したホットラインテーブルローラーが装備されている。特に薄物材の通板時には、ローラーの摩耗によるローラーレベルの不揃いにより、鋼板のウェービング現象が発生し、巻取時の品質を悪化させている。このためにローラー駆動モーター電流値を解析する方式の、ローラーレベルの精度悪化を診断する技術を開発した。一方、軸受に対しては振動法による軸受診断装置を導入している。

コイラーにおいては、鋼板の重ねぎず（トップマーク）の品質不良を防止するために、ブロッカーロール段差回避動作の性能診断として、ブロッカーロールジャンプ位置を高精度でトラッキングして、1 コイルごとにブロッカーロールのジャンプ波形をもとに診断を行い、コイル品質の保証を行うシステムを開発導入している。また、ダイナミックに、応答時間、ジャンプ高さ精度を診断しながら、その制御の基幹となるセンサー、アクチュエーターの故障予知診断も合わせて行っている。一方、段差回避動作の基幹となる機械精度の診断については、周波数応答法による診断技術を開発した。Fig. 4 にホットラインテーブル、コイラー診断技術の構成を示す。

以下各章において、

- (1) サイジングプレス制御診断および軸受診断技術
- (2) 圧延機剛性異常診断技術
- (3) テーブルローラー駆動モーター電流診断技術

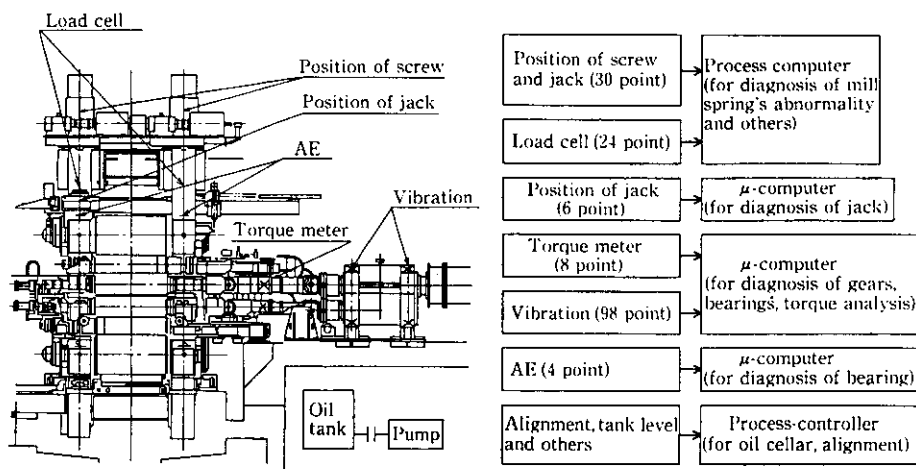


Fig. 3 Concept of crown control mill performance diagnosis system

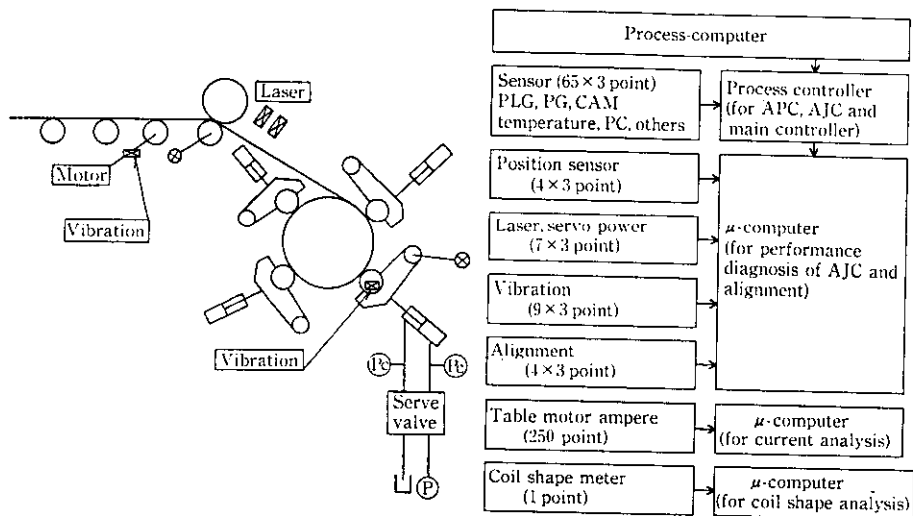


Fig. 4 Concept of AJC coiler performance diagnosis system

- (4) ブロッカーロール段差回避動作診断技術および機械精度診断技術
についてその概要を紹介する。

3 サイジングプレス制御および軸受診断技術

3.1 サイジングプレス制御の特徴⁶⁾

サイジングプレスでは、クランク運動している1対の金型の間に熱間スラブを送り込みスラブ幅方向の圧下を行う。本機の動作は、

- (1) 先後端予成形プレス
- (2) 定常部プレス

の二つのフェーズに区分けできる。Fig. 5に幅圧下動作の概念図を示す。いずれの場合もスラブを圧下している間は金型のクランク運動機構以外の部分（金型幅調整機構、スラブ搬送機構）は停止していることが製品品質、機械保護の両面から必要である。もしそうでなければ（この状態をスラブと金型の衝突と呼ぶ）スラブ側面にきずをつけたり、機械系に無理な力を加えることになる。

スラブ全長を圧下するには約30回の圧下動作を繰り返す必要がある。しかも高い生産性を要求される熱延の生産能力のネックとならないためには、1スラブの幅圧下時間を60s以下にすることが必要で、金型のクランク運動の周期を1.4s以下にすることが要求される。この条件からスラブの一定搬送に許容される時間 (T_{max}) は、下記の(1)式より0.87s以下となる。

$$1.4 - 1.4 \{ (180 - 45.6) / 360 \} = T_{max} \quad (1)$$

スラブ搬送時、スラブへの搬送駆動力はピンチロールとスラブの摩擦により伝えられるため、加速度はピンチロールの圧下力で決定される摩擦力以下に抑える必要がある。本機的设计条件では、通常のスラブにおいて許容される加速度は 4.5 m/s^2 以下となるため、これより理想的に搬送が可能であるとしても搬送に要する時間 (T_{min}) は、(2)式より0.572sとなる。

$$4.5 \times \frac{T_{min}}{2} \times T_{min} \times 2 = \text{搬送量} \quad (2)$$

つまり電気制御系での遅れを全く考慮しなくても300ms以下の時間余裕しかない。さらに金型の運動速度も圧下荷重によって変動する。これらの条件をクリアし、現存するDDC(ダイレクト・デジタル・コントローラ)システムでリアルタイムの制御が可能なら

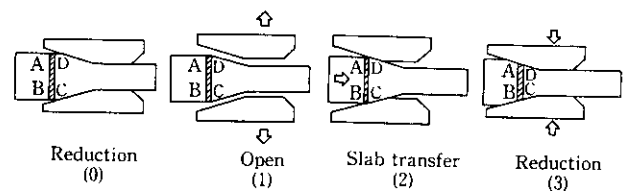


Fig. 5 Width reduction cycle using sizing press

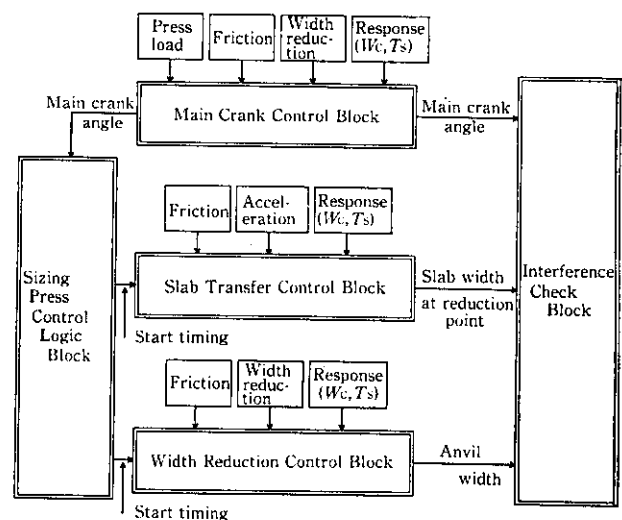


Fig. 6 Configuration of sizing press simulation model

搬送パターンは非常に限られてくる。

この問題を解決するために、筆者らは計算機モデルを用いて制御方法(協調制御)を開発し、実機でもその結果を用いることで制御に成功した。計算機モデルはFig. 6に示すように、①協調制御ロジック・干渉チェックブロック、②メイン・クランク制御ブロック、③搬送制御ブロック、④金型幅調整制御ブロックより成る。

②～④は、圧下力、機械系慣性モーメント、摩擦力等を考慮した物理モデル、およびDDC、モーター駆動系の応答速度、サンプリングタイムを考慮した電気系制御モデルの両者を組み込んだASRおよびAPCブロックから構成されており、各々パラメータを代入することで各ブロックごとのシミュレーションを行う。Fig. 7に例

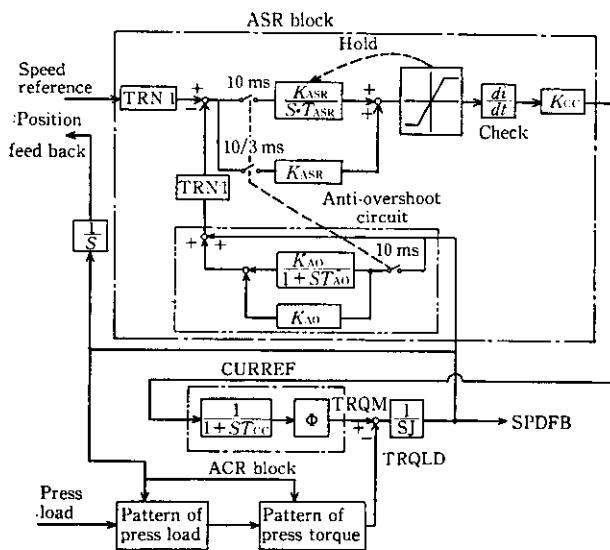


Fig. 7 Block diagram of main crank control

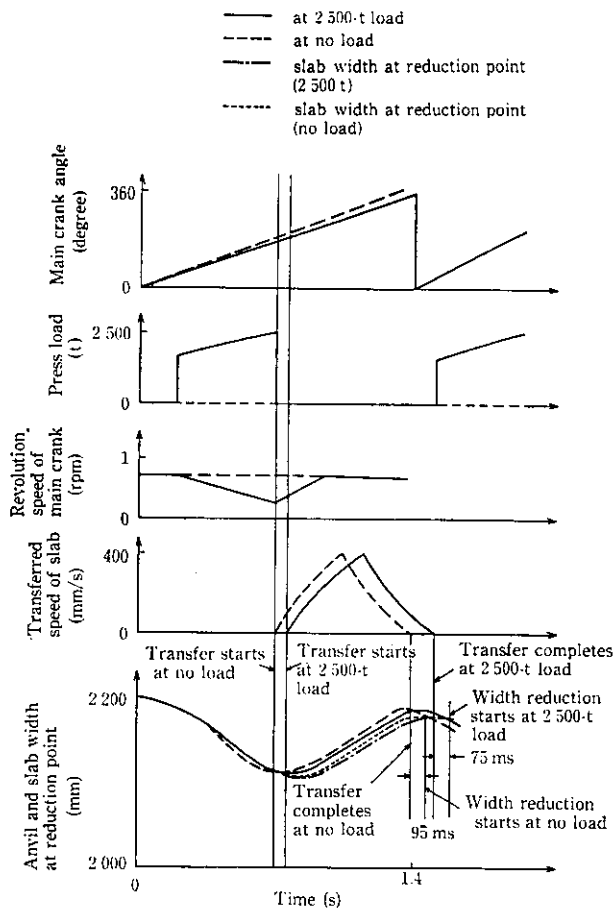


Fig. 8 Result of simulation at constant reduction

としてメイン・クランク制御ブロックのブロック図を示す。①は搬送系、金型幅調整系の起動タイミングを指定することで作図を行い、干渉チェックを実施する。

シミュレーションの例を Fig. 8 に示す。これは定常部ブレスの場合であるが、圧下荷重 0t から 2500t のすべての運転状態において安定にスラブ搬送する制御方法を求めたものである。これから

わかるように、圧下荷重、摩擦力、制御応答性等を考慮すると、時間的余裕は、前述の 300 ms よりさらに短く、75 ms しかなくなってしまう。

先後端予成形においても同様に時間的に非常に余裕のない制御を行う必要がある。したがって、予想以上のスラブの摩擦係数の変化や機械系・電気系の劣化が発生した場合に、金型とスラブの衝突が容易に発生してしまうおそれがある。以上のようなサイジングプレスの制御方法の特徴から、より安定した運転を保証するためにサイジングプレス制御診断技術の開発を実施した。

3.2 サイジングプレス制御診断技術

Fig. 9 にサイジングプレス制御診断システムの構成を示す。本システムは、制御用 DDC、リモート入出力装置と高速データウェイで結ばれた設備診断用 DDC、この DDC とモデルを介して接続されているデータ保存・解析用計算機、および HARP 軸受診断システムから構成されている。制御診断用 DDC は制御用 DDC と等しいサンプリングタイムで圧下荷重、モーター電流、速度、センサー信号などのデータを採取する。採取されたデータは 1 スラブごとに整理され、データ保存・解析用計算機に送られる。これにより高速でデータを採取し、大量のデータを保存することを可能にしている。

本サイジングプレス診断技術の機能を次に示す。

- (1) 幅圧下中にサイジングプレス動作のキーとなる時点で、その動作のキーとなる量（速度、荷重、モーター電流、圧力など）を1スラブごとに採取、保存し傾向管理、また明らかに異常である場合はオペレータにガイダンスを行うタイミング監視。
- (2) 圧延停止中にサイジングプレスの各機器を動作させ無負荷時の電流を採取、保存し傾向管理するトルク監視。
- (3) 主駆動部等の重要部位のベアリングの異常を診断する軸受監視。

Table 2 に前 2 項の主な採取項目を示す。

トルク監視は、各単体機器ごとの無負荷電流の監視を行うことによりトルクの傾向管理を行うことで、機械、電気両方の CBM（コンディション・ベースド・メインテナンス）に役立てることを目的としており、仕上げロール替え等の圧延停止時にオペレータが自動スタートプッシュボタン（PB）をオンすることにより、自動的にすべてのモーター作動機器の無負荷電流を採取する。

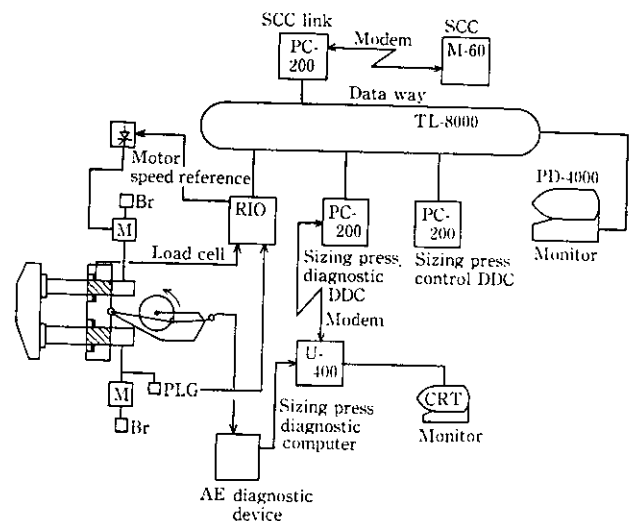


Fig. 9 Configuration of performance diagnosis of sizing press

Table 2 Output item of performance diagnosis of sizing press

No.	Output item
1	Press load
2	Impact drop value with main motor
3	Value of buckling
4	Pressure of anti-buckling roll
5	Pressure of pinch roll and hydraulic cylinder
6	Ampere of pinch roll motor and table motor
7	Speed of table and pinch roll at start point of press
8	Pressure of air brake by width reduction device
9	Position of width reduction
10	Speed of width reduction at start point of press
11	Value of position error by APC
12	Interlock
13	Condition of sensor
14	Sequence
15	Others

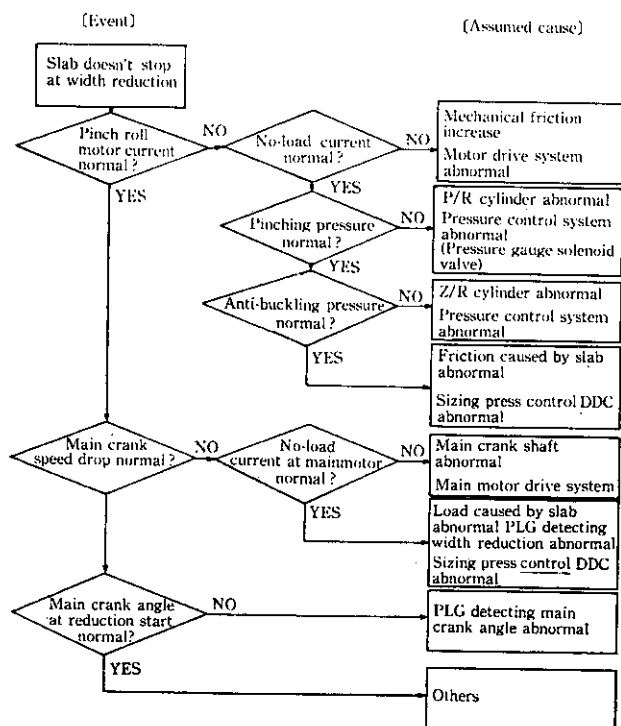


Fig. 10 Example of performance diagnosis of sizing press

タイミング監視の例を Fig. 10 に示す。定常部プレス動作中に圧下荷重が発生した時点での搬送系の速度基準と実績を常時監視することで、スラブと金型の衝突を早期に発見することができる。このとき搬送系の電流が正常でなく、さらに無負荷時の電流が増加傾向であれば、搬送系になんらかの異常があると判定できる。また無負荷時の電流は正常であるが、ピンチロールの押し付け圧力が低下していれば押し付け圧力の異常と判定できる。

本システムでは異常判定に必要と考えられるデータをすべて採取、保存しており、また必要であれば容易にデータの追加が可能なシステム構成になっているため、異常発生が発見だけでなく、通常は容易でない異常発生要因の判断も同時に行うことが可能となる。

このように本診断装置は、タイミング制約の厳しいサイジングプレ

ス制御において制御異常が生じた場合に異常を早期に発見し、同時に異常要因を判断することで長時間故障が発生するのを未然に防止することを目的として順調に稼働している。

3.3 サイジングプレス軸受診断技術

サイジングプレスの各軸受は、プレス時の衝撃による振動値が軸受損傷による振動値より大きいことおよび極低速回転であることから、振動法による異常検出は困難であり AE 法を採用した。AE 法による回転軸受診断はすでに開発完了しているが、揺動軸受や幅圧下時のノイズがある軸受での実施例がないことから、揺動軸受実験装置やサイジングプレス自身を使い、金属片のはく離発生時の AE 挙動や電気的ノイズの実験研究を行った。Fig. 11 に幅圧下動作中の AE 波の発生状況および Fig. 12 にプレス圧下中の軸受正常時と異常時の AE 波の発生状況を示す。この結果、

- (1) プレス圧下開始時と終了時に大振幅 AE が発生し、プレス圧下中にも常に小振幅 AE が発生していること
- (2) 大振幅 AE は波長上および小振幅 AE は持続時間上から、金属片のはく離発生時の AE とは異なり、ノイズであることが判明した。

一方、揺動軸受の揺動角度は ± 1.7 度と微小角であるため、回転軸受のようにきずに対応する特性周波数が得られなかったが、負荷中の特定位置に AE 波が発生することをつきとめ、クランク位相角度ごとに AE を計測して損傷を診断する方式とした。Fig. 13 にサイジングプレス軸受診断のシステム構成を示す。現在、当システムにより常時軸受を監視している。

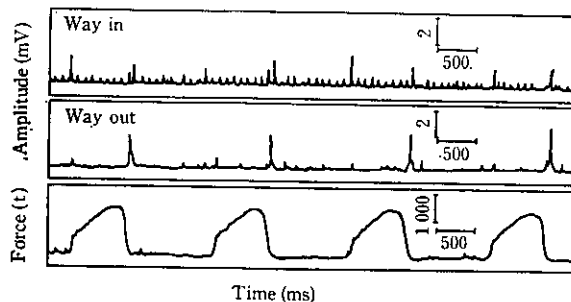


Fig. 11 AE envelope waveform (pitman bearing)

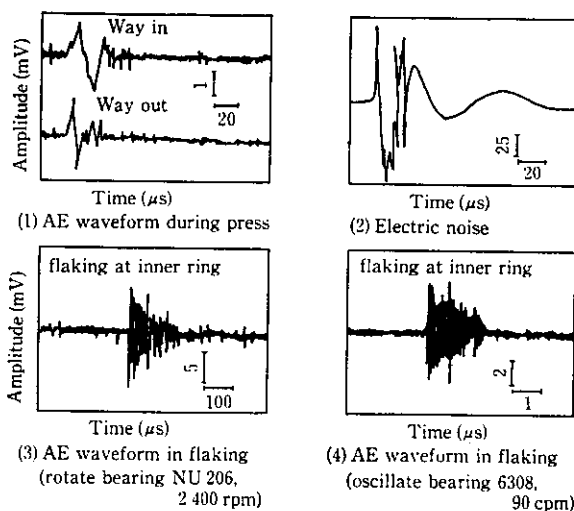


Fig. 12 AE field data and AE waveform in flaking

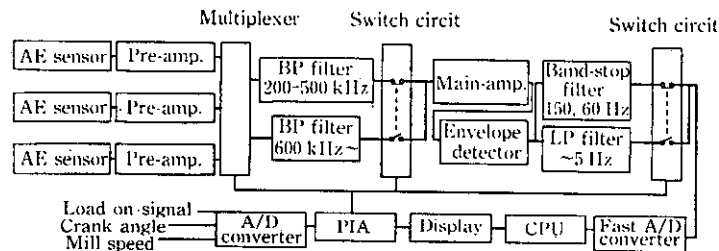


Fig. 13 Diagnosis system of sizing press bearing by AE method

4 圧延機剛性異常診断技術

4.1 クラウン制御ミルの剛性

圧延機の剛性は、縦剛性と横（平行）剛性の二つの剛性特性を有している。縦剛性は、OP 側と DR 側の同時圧下操作時の和荷重を圧下量で除した数値で、通常ミル定数と呼ばれるものである。一方横剛性は、作業側と駆動側の片圧下操作時の差荷重を片圧下量で除した数値であり、板の蛇行のしにくさを表すものである。クラウン制御ミルでは、ワークロールあるいは、中間ロールをロール軸方向にシフトして圧延する時、横剛性が著しく低下するという欠点を有している。

Fig. 14 に、シフトのない時および最大限シフトした場合の、OP 側と DR 側ハウジングのたわみ差、差荷重および蛇行量の関係を示す。ともになんらかの要因で差荷重が発生した時を想定したもので、(a) は横剛性が高く、たわみ差も小さく、許容蛇行量内にあり安定した圧延状態の場合である。(b) は横剛性が低くなり、たわみ差が大きく、その分蛇行量が大きくなり不安定な圧延状態の場合である。この関係から、ロールシフト量を大きくして圧延した時の蛇行量を小さくするために、発生する差荷重を小さくすることが重要であることが分かる。

一方、圧延機の縦剛性を支配している圧下装置は、多数の部品より構成され、片側約 1500 t の圧延荷重を支えている。高荷重により圧縮変形や摩耗が生ずるだけでなく、反り変形も生じ、平坦度や精度悪化により剛性が低下し、OP 側と DR 側との縦剛性がアンバランスとなり、同一量圧下しても差荷重を生ずる。このように、クラウン制御ミルの主に圧下系設備の精度悪化に起因して発生する差荷重による蛇行発生を抑制するために、差荷重の変動パターンを監視

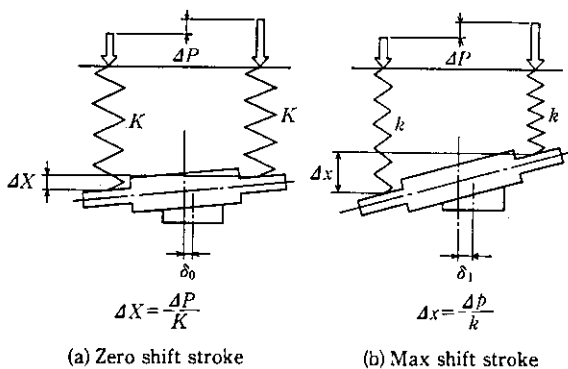


Fig. 14 Relation of camber and mill spring difference value with rolling load (OP side-DR side)

視し、悪化部位を診断して早期に設備精度を回復することが必要となった。

4.2 圧延機剛性異常診断技術

圧延機は一般に Fig. 15 に示されるようなバネモデルとして考えられる。今 ΔS だけ圧下量を締め込むと、ミルの各部は弾性変形を生じその総変形量が $\Delta S'$ と等しくなる。ミルの各部を、ハウジング、ロール、圧下装置および下部キャリジに分けて考え、それぞれのバネ定数を K_H , K_R , K_S , K_C とし、荷重の増分を ΔP 、圧下量の変位を ΔS とすれば、ミル定数 K は、

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{1}{\frac{1}{K_H} + \frac{1}{K_R} + \frac{1}{K_S} + \frac{1}{K_C}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

として表される。

通常圧延機は、OP 側と DR 側の両方にロードセルや圧下量を計測するセルシンを有しており、OP 側 DR 側それぞれ単独にミル定数を計測できる。両側のミル定数差から差荷重を取り出し、差荷重の変動パターンにより劣化部位が判定できる。Table 3 に代表的な差荷重変動パターンと、予想される設備劣化部位の関係を示している。上部の圧下装置と下部のキャリジまわりの平坦度や精度の悪化により差荷重が生ずる場合は、上部か下部かの正確な部位判定が困難である。このような場合は、Fig. 15 の関係から、圧下装置のバネ定数 K_S は、

$$K_S = \Delta P / [\Delta S - (S_1 - S_0)] \quad \dots\dots\dots (4)$$

として求められることから、 S_1 と S_0 の差を計測して両側の圧下装置のバネ定数を求める。もしバネ定数差が生じておれば、上部の圧下装置と判定し、バネ定数差が生じていなければ、下部のキャリジが劣化部位と判定する。

このように、OP 側と DR 側のミル定数計測から差荷重の変動パターンを監視し、一次の劣化部位を判定し、さらにはバネ定数の計

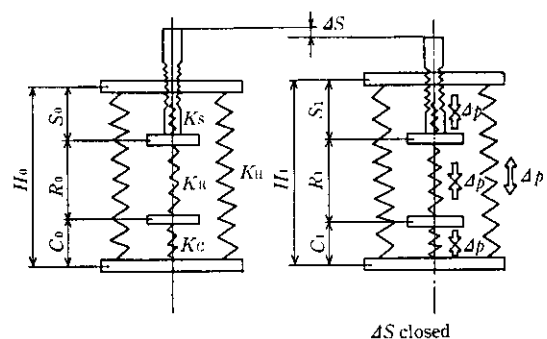


Fig. 15 Model of mill spring with screw down device

Table 3 Relation between mill spring irregular pattern and damage parts with abnormality of mill spring

Case	Mill spring irregular pattern	Damage parts
1		Nothing
2		- Screw down device - Buck up roll carriage - Load cell - Pressure block
3		- Screw down device - Buck up roll carriage - Pressure block
4		- Screw Nut - Screw
5		- Screw down block - Hydraulic jack - Pressure block

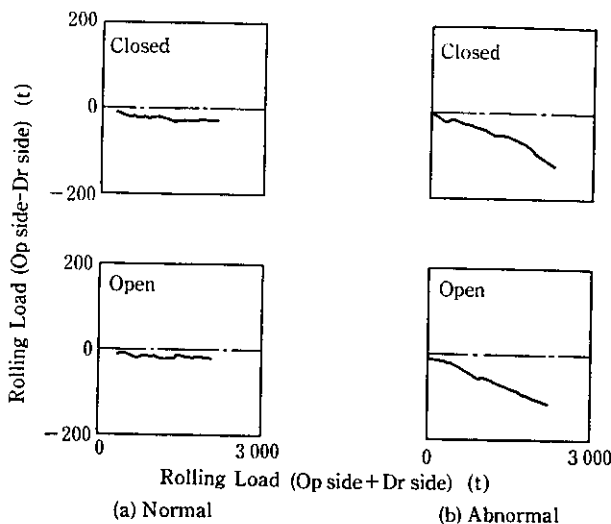


Fig. 16 Example of diagnosis of the abnormality of mill spring with rolling mill

測により上部または下部かの劣化部位を判定する方式の圧延機剛性異常診断技術を開発した。

当診断技術による活用事例を紹介する。Fig. 16 に診断装置よりアウトプットされた帳票の一例を示す。OP 側と DR 側の両側の圧延荷重の和 (和荷重) と両側の圧延荷重の差 (差荷重) の関係を示しているもので、左図は Table 3 のケース 1 に相当し、異常のない場合である。右図はケース 2 に相当し、圧下装置、下部キャリッジおよびロードセルに異常があると考えられる場合である。この場合には圧下装置のパネ定数計測へのステップへ進むことになる。

Fig. 17 に剛性異常発生前後の圧下装置パネ定数の帳票例を示す。左図は異常発生時のもので、圧下装置に異常があることが判定できた。当診断装置の情報をもとに、圧下装置圧力台の取り替えを実施したところ、右図のように圧下装置のパネ定数差もなくなり、差荷重の発生もなくなった。差荷重異常時の圧力台には、上バックラップロールチェックとの接触面に未接触部があり、平坦度不良が起因していることも明確となった。

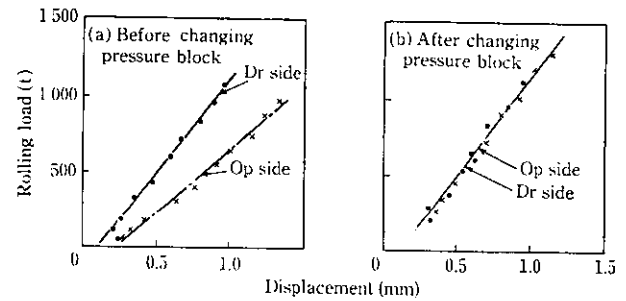


Fig. 17 Relation between rolling load and displacement caused by the abnormality of mill spring

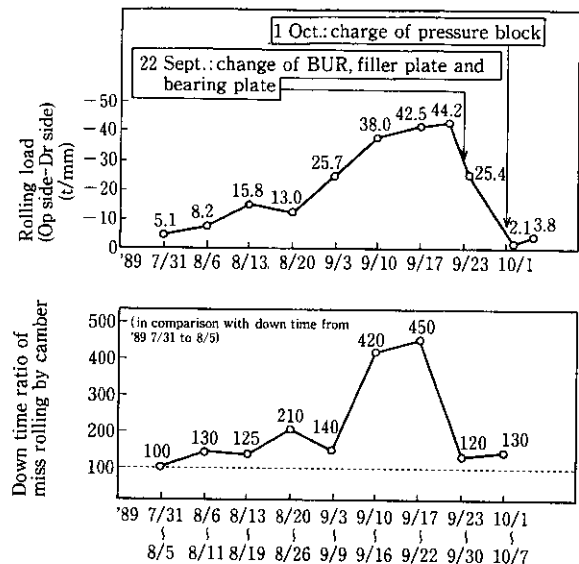


Fig. 18 Relation between rolling load (OP side-DR side) and down time ratio which is caused by miss rolling due to camber

Fig. 18 に週別の差荷重、蛇行発生による圧延休止率の推移および圧力台の取替時期の関係を示している。このように日常的に剛性異常診断を活用することにより、原因不明のまま蛇行による圧延休止が長期間頻繁に発生して生産量を低下させたり、各装置のメンテナンスがオーバーになり必要以上に修繕費をかけることがなくなった。

5 ホットランテーブルモーター電流診断技術

5.1 診断技術⁹⁾の必要性

ホットランテーブルは、全長が 200 m 近くもあり、最大 1500 mpm の高速で鋼板をコイラーまで搬送している。当テーブルでは、ローラーの摩耗によるローラーレベルの不揃いや、ローラー周速のバラツキにより、鋼板先端の搬送時、ウェービングという現象が発生し、最悪時にはミスコイルになる場合もある。また上部からの冷却水により、ローラーベアリングやモーターの損傷も生じやすく、モーターカップリングの芯ずれ、ロールアンバランス、架台の振動といった異常現象も発生し、きめ細かな設備管理が必要とされている。

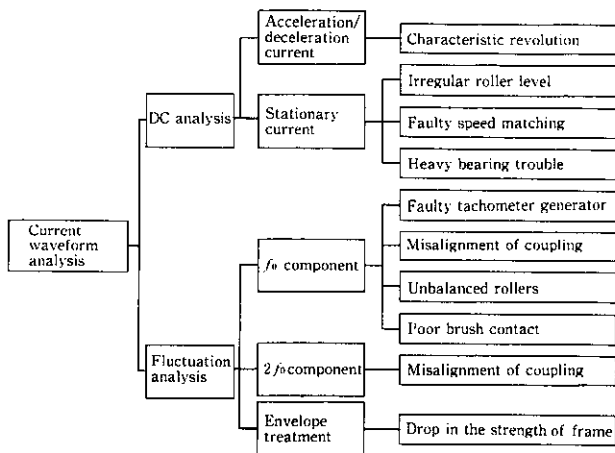


Fig. 19 Diagnostic item of electric current analysis

ローラーベアリングの異常予知に対しては、振動法による診断が確立されているが、今回テーブルモーター電流値を解析することにより、テーブルローラー設備管理のための総合的な診断方法を開発した。Fig. 19にモーター電流解析による診断可能な異常現象項目を示す。ベアリングのみでなく、ローラー、モーター、センサー、アライメント、速度精度等の診断が可能である。この中で、直流分の解析の代表的なパスライン診断事例と、変動分の解析のカップリング芯ずれ診断の原理を紹介する。

5.2 診断原理と事例

定常分の解析によるローラーレベル診断方法は、ローラーレベルが摩耗により低くなった場合には、負荷電流が下がることを応用したものである。Fig. 20に実機での検証例を示すが、#254、#259ローラーが新品ローラーであるために、ローラーレベルが高く、その他

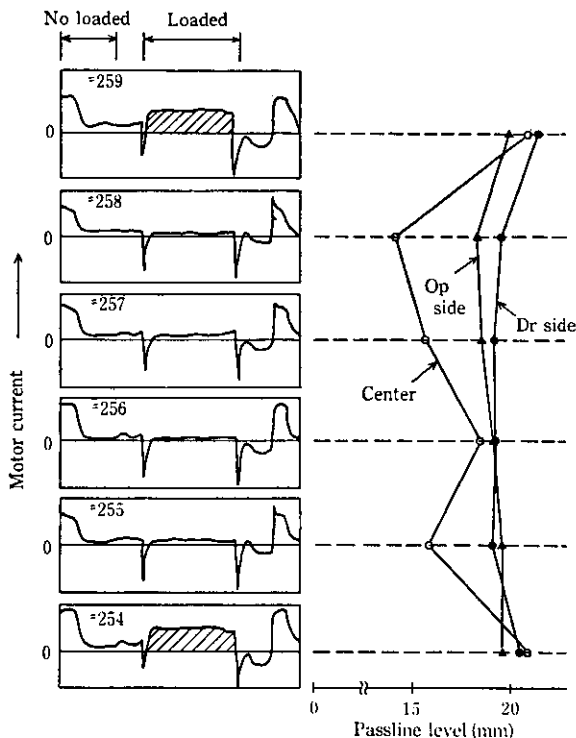


Fig. 20 Example of passline diagnosis by DC analysis

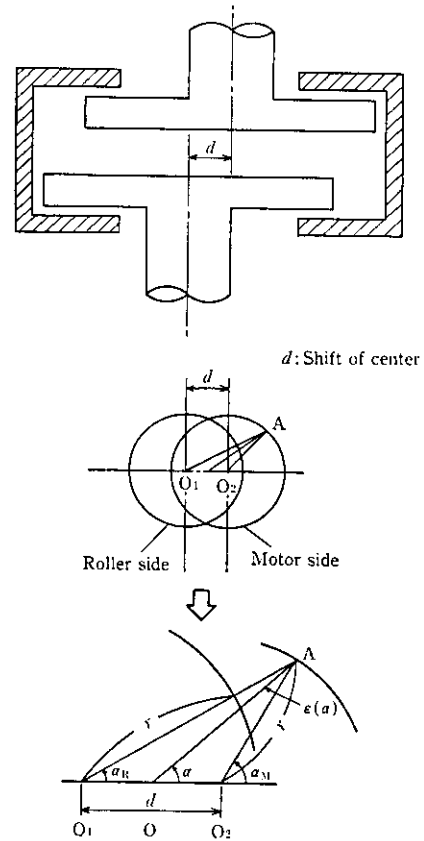


Fig. 21 Positional relationship of couplings viewed in axial direction

のローラーの負荷電流が低いことが分かる。この現象を利用して、鋼板搬送時のモーター負荷の比較および隣接するローラーとの負荷比較により、ローラーレベルの診断を行い、パスライン修正の保全計画につなげている。

変動分解析の例として、Fig. 21に示すようなローラーとモーターを連結しているカップリングにミスアライメントがある場合に、モーター電流がどのような影響を受けるかを考察する。ローラー軸とモーター軸に芯ずれ d がある場合、軸の回転ごとに、タイヤ形カップリングは伸縮し、軸と直角方向の応力が発生する。任意の位相角 α における二つのカップリング端面でのズレ $\varepsilon(\alpha)$ 、カップリング微小部分 $r \times d\alpha$ が受ける応力 ΔF は、(5) および (6) 式より求められる。

$$\varepsilon(\alpha) = d \cos \alpha \quad (5)$$

$$\Delta F = k \times \frac{r \times d\alpha}{2\pi r} \times [\varepsilon(\alpha) - \varepsilon(\alpha - \theta)] \quad (6)$$

ここで、 k : カップリングのパネ定数

また、モーターの負荷トルク $T(\theta)$ は、 $|\Delta F| \times \mu r \varepsilon$ を積分することにより (7) 式より求められる。

$$T(\theta) = \frac{2\mu k r d}{\pi} \times \left| \sin \frac{\theta}{2} \right| \quad (7)$$

(7) 式をフーリエ変換すれば、直流分のほかに $n\theta$ (n : 自然数) の高調波成分が含まれ、軸の周波数 f_0 の整数倍のトルク脈動が発生することが分かる。

このように、モーター電流の直流分、変動分解析により、広範囲にわたる異常現象の把握ができ、設備管理精度向上に寄与している。

6 コイラー制御および機械精度診断技術

6.1 診断技術の必要性

コイラーはホットランテーブルによって高速搬送された鋼板を巻き取る設備であり、鋼板の先端を巻きつけるために、マンドレルの外周に数個(3~4)のブロッカーロール(B/R)が設けられている。鋼板の先端がマンドレル上に到達してから、マンドレルに強固に巻きつけられるまで数周B/Rによって押し付けている。しかしB/Rを鋼板に押し付けたままにしておくと、鋼板の先端が回ってくるごとに、その位置に段差があるため、B/Rと強く接触し鋼板の一部にきず(トップマーク)がつくことになる。そのため先端位置が回ってくるたびにB/Rをジャンプ駆動させて、鋼板の先端を避けて押し付ける段差回避制御(AJC)への改造が行われてきている。従来は極厚板巻取機のみを改造していたが、近年は薄板用巻取機へも適用されつつあり、当社でもすべてのコイラーがAJC化改造されている。

当AJCコイラーにおいて、機械装置の一部の摩耗や油圧サーボ弁の若干の応答遅れに起因して、正常なAJCが行われない場合は、トップマークによる品質不良が発生し、次工程での工程攪乱につながる。しかも高度で複雑化したメカトロ装置であることから、従来の点検方式では技術的に正常な状態に維持管理することが困難であると考えた。そのために、AJC化改造と同時に、

- (1) 段差回避動作精度をリアルタイムで自動的に診断し、1コイルごとに巻取品質の良否を判定でき、かつ段差回避動作精度不良の原因となりやすい、センサー、アクチュエーターの性能をリアルタイムで診断するAJC診断技術
- (2) 段差回避制御の基幹となる機械精度を、センサーを用いることなく簡易に診断する機械精度診断技術の開発を行った。以下二つの診断技術の概要を紹介する。

6.2 段差回避動作診断技術

段差回避動作を検出する方法には、ブロッカーロール(B/R)開閉シリンダーの油圧圧力による方法と、B/Rの高さ位置による方法がある。極厚板巻取機の場合は、B/Rフレームの慣性力が大きいため油圧圧力による検出は可能である。しかし薄板巻取機のB/Rフレームは、低慣性になるために検出が困難であり、B/R高さ位置を検出する方法を採用した。

AJCは、レーザーにより鋼板の先端を検出し、ピンチロールのバルスゼネレーター(PLG)の検出信号を入力して、サーボ弁を介して油圧シリンダーを駆動することにより行われる。B/Rのマンドレル外周面に対する高さ位置は、回転マグネスケールによりアームの回転角として検出されている。

当診断装置によって、リアルタイムで、段差回避速度、段差回避高さ、センサー性能、シリンダー性能等の診断が行われる。Fig. 22に診断装置の表示の一例を示す。4個のB/Rごとの段差回避状態の波形で、縦軸が高さを表し横軸が時間を表しており、一見してAJC制御性の良否が見極められる。

当診断装置の具体例をもとに、段差回避速度診断について説明する。Fig. 23に段差回避速度診断ロジックの一例を示す。マグネスケールから得られるB/R高さ検出信号は、速度演算手段に入力され、高さの変化状態から回避速度 S が算出される。異常判定は、速度基準値 S_j に所定の速度変動許容値 $\pm X_{jL}$ を掛けた値を基準速度範囲として設定し、速度算出値と比較する方式により行う。

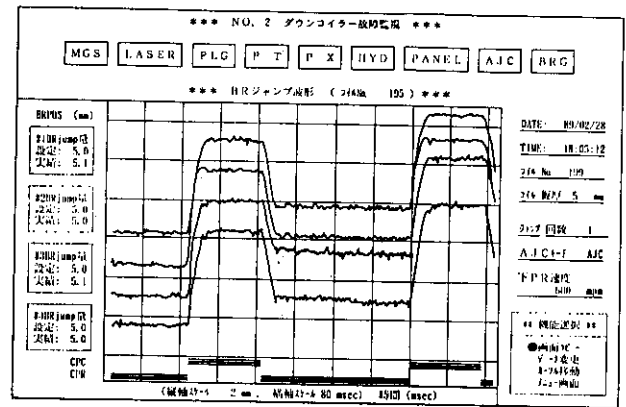


Fig. 22 Example of blocker roll position analysis with performance diagnosis of AJC

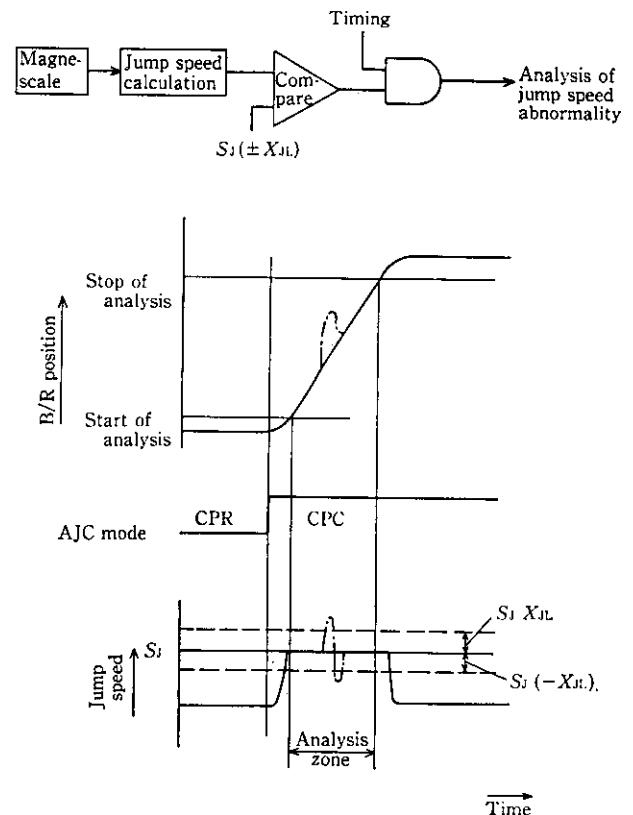


Fig. 23 Example of monitoring flow with jump speed abnormality by performance diagnosis of AJC

$$\left. \begin{aligned} S_j(-X_{jL}) &> S \\ \text{または、} \\ S_j X_{jL} &< S \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

の状況が生じた時に、回避速度異常と判定して、当該巻取コイルの品質異常表示を出力する。

このように、巻取完了後直ちにAJC制御診断を行うために、トップマークによる巻取品質不良コイルは、リジェクトされ次工程へは流れないようにしている。

6.3 機械精度診断技術

AJC油圧サーボ系において、応答性を悪化させる主な要因は機械装置の機構部の摩耗である。この摩耗の測定には、多大な労力と

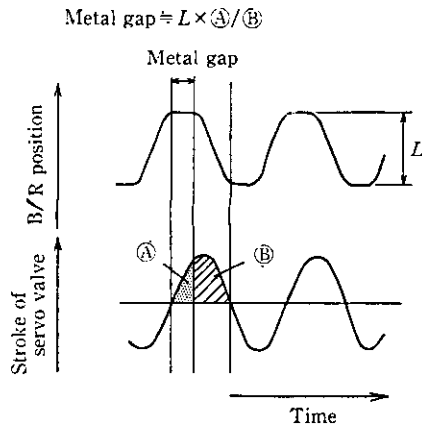


Fig. 24 Detection of metal gap with B/R flame

時間を費すために、摩耗測定作業を簡便に行えるようにするための精度診断装置が必要であった。

油圧サーボ系が十分追従し得る程度の正弦波入力で系を加振した場合を考える。機構部に摩耗がない場合には、サーボバルブの開度および機構部の位置はともに正弦波状に変化するが、摩耗がある場合には、機構部の位置の変化は Fig. 24 に示すような挙動を示す。つまり、機構部位置の上下限部に平坦な部分が現れることになり、このことから摩耗の有無を判別できる。また平坦な波形を示す期間中にシリンダーに流入する油量（図中の A の面積）と、機構部位置のフルストローク分を移動させるための油量（図中の B の面積）との比から、摩耗量は、A の面積 / B の面積比と機械位置振幅 (L) の積として求めることができる。なお、油量はサーボバルブ開度の積分値より求める。

当原理を応用した機械精度診断を実機に適用して精度管理業務の

効率化に役立っている。

7 結 言

当社で開発適用し成果をあげている診断技術のうち、熱延の主要設備であるサイジングプレス、圧延機、テーブル、コイラーに適用している技術について紹介した。

- (1) サイジングプレス制御および軸受診断技術は、時間的余裕のない幅圧下動作、搬送動作の制御を診断し、かつ機械設備の基幹となる軸受を診断する。
- (2) 圧延機剛性異常診断技術は、クラウン制御ミルの圧下設備精度悪化に起因して発生する差荷重を監視し、悪化部位を診断する。
- (3) ホットランテーブルでは、モーター電流診断により、パスライン精度やモーターカップリングの芯ずれを診断する。
- (4) コイラー段差回避動作診断技術は、リアルタイムで段差回避動作の精度、応答性を診断する。

共に、設備リフレッシュに合わせて、その必要性を見極めて段階的に開発適用を進めたものである。複雑化高度化した設備のメンテナンスに対しても、まだまだ五感に頼らざるを得ない部分が大半である。しかしブラックボックス的存在になりつつある設備では、設備診断技術の開発によりメンテナンスの質的内容を変えていかなければならない。今後は、現在開発適用した診断技術を生産現場にしっかりと定着させるとともに、さらに広い情報を取り入れ、かつ経験則を利用したより熟練したメンテナンスマンの判断に近いエキスパートシステムの構築が課題となるであろう。これからも高度な設備へのリフレッシュが続いていくなかで、製品品質を含めた総合的設備診断技術の開発と、より信頼性の高いプロセス診断技術の開発に努力していきたい。

参 考 文 献

- 1) 近藤 徹, 藤原煌三, 直井孝之, 阿部英夫: 鉄と鋼, 73 (1987) 10, S1099
- 2) 田野村忠郎, 菱沼 至, 足立明夫, 竹谷昭彦, 広瀬勇次, 三宅祐史: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 3, 225-230
- 3) 滝沢昇一, 藤原煌三, 平山勝久, 播本 彰, 葛原民雄, 中西正夫: 鉄と鋼, 73 (1987) 4, S369
- 4) 直井孝之, 柴田克巳, 浜田圭一, 梅本純生, 広瀬勇次, 三宅祐史: 鉄と鋼, 70 (1984) 4, S430
- 5) 井上紀明, 尾崎研吾, 佐藤式也, 米山隆雄, 掛札 優, 屋岡修一: 川崎製鉄技報, 17 (1985) 4, 394-400
- 6) 花田敏博, 石川好蔵, 土井克彦, 藤原煌三, 植木 茂, 内田秀史: 材料とプロセス, 1 (1988), 560
- 7) 三宅祐史, 鍵田征雄, 浜田圭一, 広瀬勇次, 小川洋三, 豊島 貢: 川崎製鉄技報, 16 (1984) 4, 235-246
- 8) 日本鉄鋼協会: 設備診断技術ハンドブック