

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.33 (2001) No.1

機械設備の保全技術特集号

圧延プロセスの非定常負荷発生機構の解明と抑制策

Analysis of Unsteady Load Mechanism in Strip Rolling Processes and Its Control in Commercial Line

紺野 洋司(Yoji Konno) 渋谷 聡(Satoshi Shibuya) 田中 伸治(Shinji Tanaka)

要旨：

熱間圧延工場では、熱、水、衝撃という悪条件下において設備信頼性の維持と向上を図ることが重要課題である。特に圧延プロセスにおける材料噛み込みおよび尻抜け時の非定常圧延領域で発生する衝撃負荷はバッチ式の圧延機では避けられないため、その発生メカニズムの解明と定量評価は設備の設計と管理上非常に重要である。本稿では、非定常圧延時にロールが材料から受ける水平方向力を力学的アプローチにより定式化し、ロール挙動のメカニズムの解明とロールとハウジングの衝突により発生する衝撃力の定量化を行った。この衝撃力を増幅する要因として、機械的隙間の存在が大きく影響することも力学モデルから定量的に示された。また、隙間の管理を厳格に行うことにより衝撃力が効果的に低減されることを示した。これらの知見に基づき、水平方向ロール拘束精度向上のための設備改善を実施した結果、稼働安定に寄与した。

Synopsis：

In hot rolling process, it is a very important subject to improve and maintain the reliability of equipment under severe conditions arising from heat, water and impacts. Especially, the impact load, which appears at unsteady rolling of the leading and tailing ends of a strip, is an inevitable factor. So it is particularly important to analyze the mechanism of the impact load and estimate the impact load quantitatively, for the design and maintenance of equipment. In this paper, a formulation of the horizontal force to a roll, which is given by material at unsteady rolling, has been carried out by using a mechanical approach. Moreover, by using this formula, the mechanism of the roll movement has been made clear, and the impact load, which is produced by collision between roll chock and housing, has been quantified. In this analysis, it was proved quantitatively by using the mechanical model that a mechanical gap was one of the most effective causes of the amplification of this impact load. Furthermore, it was also shown that controlling the mechanical gap decreased the influence of the impact load. Based on the results of the analysis, improvement of the roll restrictive accuracy of the horizontal direction has been achieved and this improvement has contributed to the

operational stabilization.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Analysis of Unsteady Load Mechanism in Strip Rolling Processes and Its Control in Commercial Line



紺野 洋司
Yoji Konno

水島製鉄所 設備技術
部開発設計室 主査
(掛長)



渋谷 聡
Satoshi Shibuya

水島製鉄所 設備技術
部開発設計室 主査
(課長)



田中 伸治
Shinji Tanaka

水島製鉄所 設備技術
部設備技術室 主査
(主席掛長)

要旨

熱間圧延工場では、熱、水、衝撃という悪条件下において設備信頼性の維持と向上を図ることが重要課題である。特に圧延プロセスにおける材料噛み込みおよび戻抜け時の非定常圧延領域で発生する衝撃負荷はバッチ式の圧延機では避けられないため、その発生メカニズムの解明と定量評価は設備の設計と管理上非常に重要である。本稿では、非定常圧延時にロールが材料から受ける水平方向力を力学的アプローチにより定式化し、ロール挙動のメカニズムの解明とロールとハウジングの衝突により発生する衝撃力の定量化を行った。この衝撃力を増幅する要因として、機械的隙間の存在が大きく影響することも力学モデルから定量的に示された。また、隙間の管理を厳格に行うことにより衝撃力が効果的に低減されることを示した。これらの知見に基づき、水平方向ロール拘束精度向上のための設備改善を実施した結果、稼働安定に寄与した。

Synopsis:

In hot rolling process, it is a very important subject to improve and maintain the reliability of equipment under severe conditions arising from heat, water and impacts. Especially, the impact load, which appears at unsteady rolling of the leading and tailing ends of a strip, is an inevitable factor. So it is particularly important to analyze the mechanism of the impact load and estimate the impact load quantitatively, for the design and maintenance of equipment. In this paper, a formulation of the horizontal force to a roll, which is given by material at unsteady rolling, has been carried out by using a mechanical approach. Moreover, by using this formula, the mechanism of the roll movement has been made clear, and the impact load, which is produced by collision between roll chock and housing, has been quantified. In this analysis, it was proved quantitatively by using the mechanical model that a mechanical gap was one of the most effective causes of the amplification of this impact load. Furthermore, it was also shown that controlling the mechanical gap decreased the influence of the impact load. Based on the results of the analysis, improvement of the roll restrictive accuracy of the horizontal direction has been achieved and this improvement has contributed to the operational stabilization.

1 緒 言

水島製鉄所熱間圧延工場は、本年で稼働開始から 30 年という節目の年を迎えた。これまで幾多の機能改善や信頼性向上を目的とした設備改造を実施し、今日では高い生産性を有する工場としてその地位を築いてきた。熱間圧延製造プロセスでは、熱、水、衝撃といった過酷な条件が作用するため、設備機能を適正に維持管理していく負荷は甚大である。中でも圧延プロセスの非定常圧延領域にて発生する衝撃負荷に関しては、圧延特性上不可避であり、さらなる稼働性能の向上を図るためには、こうした衝撃負荷のメカニズムの解明と定量予測できる技術確立および低減施策が重要となる。

本稿では材料が圧延ロールに噛み込んだ瞬間のロールの水平方向

挙動とロールとハウジングの衝突により発生する衝撃力を力学的アプローチによりモデルとして定式化する。本モデルの有効性を実測データにより検証し、隙間管理の厳格化による衝撃力低減効果を示す。最後に具体的設備改善事例として水平方向のロール拘束機能向上対策について述べる。

2 機械精度と故障の関係

定常圧延状態にて圧延機に作用する代表的な負荷は、Fig. 1 に示すように、圧延トルク、圧延荷重、ロールスラスト力およびロールパス方向力である。実操業においては、材料先端の噛み込み、尾端の戻抜けの非定常負荷が定常圧延時の負荷より大きく、強度設計上重要である。この非定常負荷の存在は一般的に認識されており、実験的にも解析的にも種々の研究がなされているが、衝撃力の定量的評価という意味では十分な知見が得られていない。これは衝撃力の

* 平成12年11月10日原稿受付

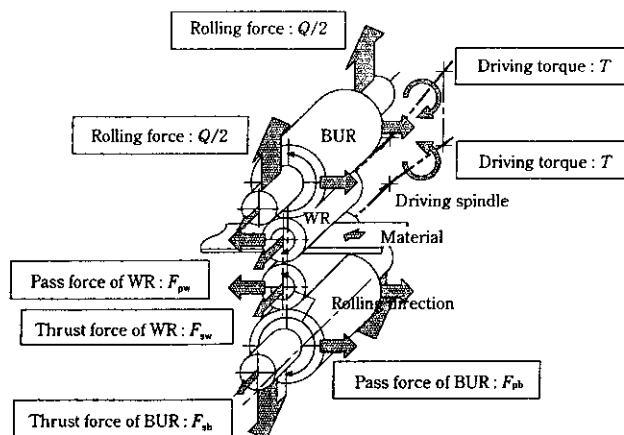


Fig. 1 Active load of roll of rolling mill

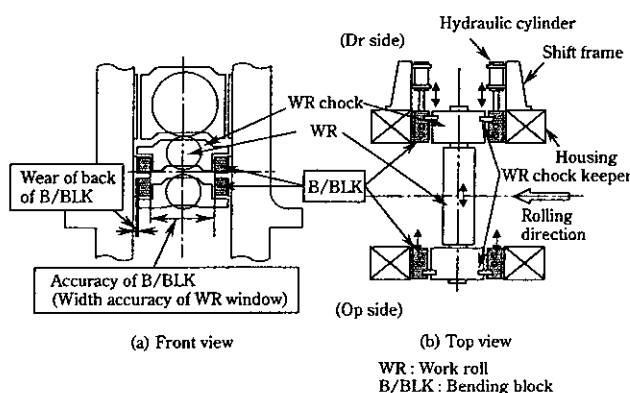


Fig. 2 Structure of finishing mill WR shift device

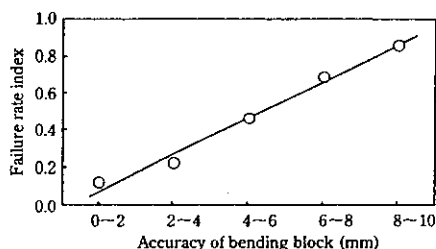


Fig. 3 Relation between mechanical accuracy and failure rate of WR shift device

実測りや部分的考察はなされているにも関わらず、衝撃力自身の発生機構の究明や発生現象の観察を系統的に行うのが困難なためである。

圧延機の機械装置を駆動系とハウジング系とに大別すると、駆動系では材料噛み込み時に各機器のねじり剛性と機械的隙間の影響から過大なねじり振動が発生することが知られており²⁻⁴⁾、駆動スピンドルの強度設計に活かされている。一方、ハウジング系で問題視されるのはロールショックとそれを拘束する周辺設備に作用する非定常負荷である。中でもパス方向力に関しては、ロールショックとハウジングウィンドウ間の隙間が負荷を増幅する要因となり過大な衝撃力を発生すると考えられるが、その詳細なメカニズムに関しては解明されていない。

本章では、隙間（機械精度）と故障発生率の関係を探るため仕上ミルハウジングウィンドウ幅寸法精度とベンディングブロック付随

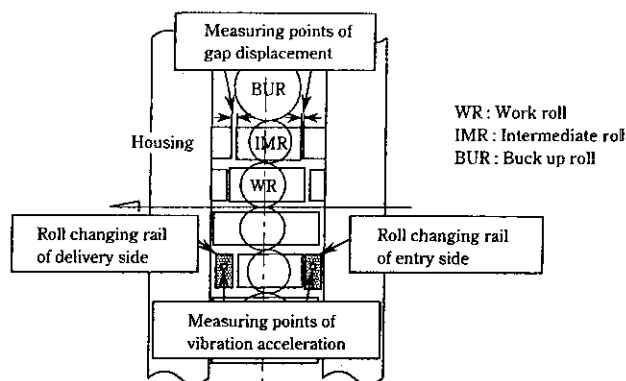


Fig. 4 Measuring points at finishing mill

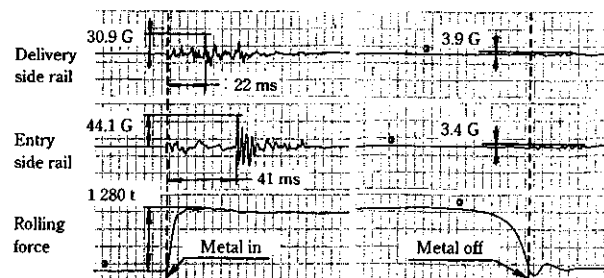


Fig. 5 Chart of vibration acceleration at roll changing rail

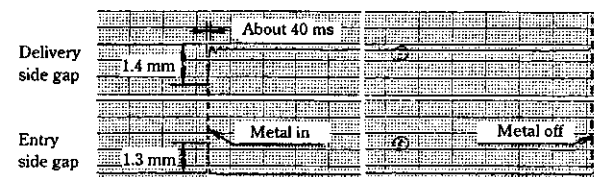


Fig. 6 Chart of gap displacement at upper IMR

部品の故障発生率の相関評価を行った。

仕上ミルワークロール (WR) シフト装置構造を Fig. 2 に、ベンディングブロックの実測精度と故障発生率指数の関係を 5 年間分のデータを基に整理した結果を Fig. 3 に示す。ここでベンディングブロック精度とは、ベンディングブロック背面の摺動摩耗量を指し、摩耗量が少なければハウジングウィンドウギャップは小さくなる。Fig. 3 から明らかなようにベンディングブロック精度劣化にともない故障発生率が増大する。故障を発生させる根源には精度劣化による非定常負荷の増大が影響していると考えられる。

3 非定常負荷評価モデルの定式化

3.1 ロール挙動と衝撃力の実測

被圧延材がロールに噛み込む際にロールは材料からパス方向に力を受け、ハウジングとの衝突により衝撃力を発生する。このときのロールの挙動および衝撃力を把握するため仕上ミル後段スタンドの上下中間ロール (IMR) にて測定を行った。測定項目は、Fig. 4 に示す、上ロールショックとハウジング間のギャップ変位量と入側および出側組替レール振動加速度値である。なお、組替レールはロール交換時に上下可動する機構であり、下 IMR のウィンドウブロッ

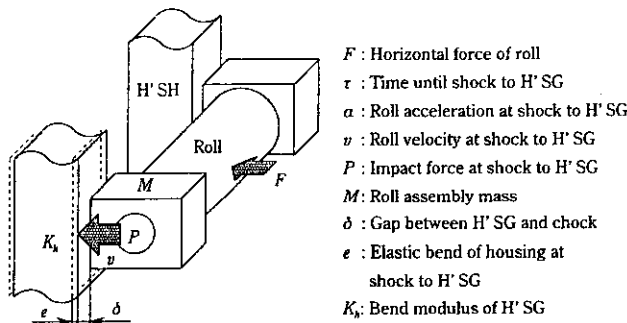


Fig. 7 Backlash impact model between housing and chock

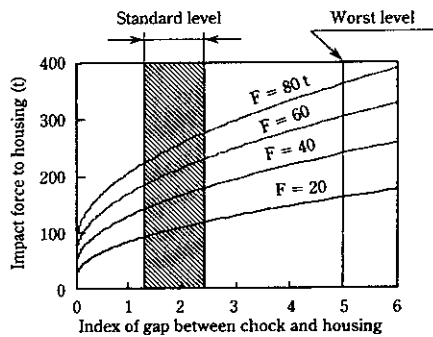


Fig. 8 Impact force between chock and housing

くも兼ねる装置である。組替レール振動加速度チャートを Fig. 5 に、ギャップ変位チャートを Fig. 6 に示す。

Fig. 5, 6 のチャートから、ロール空転時はロールオフセット分力により入側ハウジングへ押し付けられていたロールが、材料噛み込み後約 40 ms の間に入側から出側に移動し、さらに入側にもどるといふ挙動を示すことが分かった。また、入側から出側および出側から入側へ移動する際にチョックとの衝突により組替レールには 30~40 G の過大振動加速度が発生することも分かった。

3.2 定常・非定常ロール水平方向力モデル

前節での実測知見からハウジングとロールチョックの衝突現象を力学的に評価しうるモデルの定式化を行った。Fig. 7 にモデルの概念図を示す。

質量 M のロールがパス方向（水平方向）力 F を受け、加速しながら隙間 δ を移動の後、ハウジング衝突直前に速度 v に達する。ロールチョックがハウジングに衝突する際、(1) 式に示されるようにロールチョックの運動エネルギーとハウジングの弾性変形エネルギーが釣り合い、ハウジングにたわみ量 e が生ずる。たわみ e を発生させる力 P が衝突時の衝撃力としてハウジングとチョック間に作用する。(2) 式の P_1 がパス方向に作用する合力である。

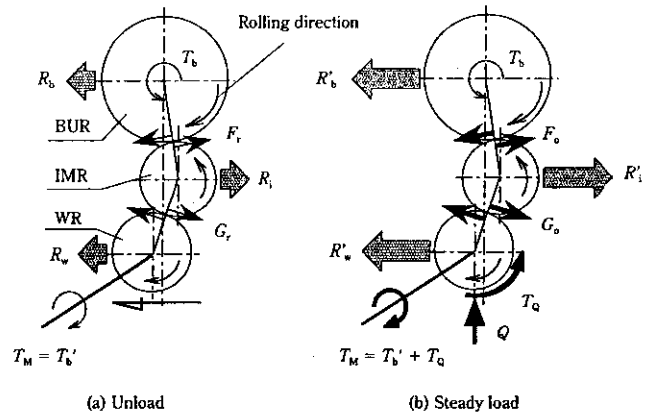
$$\frac{Mv^2}{2} = Pe \quad (1)$$

$$P_1 = F + \sqrt{2K_h F \delta} \quad (2)$$

熱間圧延仕上圧延機のハウジング横たわみ剛性値 K_h とロールに作用する水平力 F をパラメータとして入力して数値計算した結果を Fig. 8 に示す。数値計算結果は、仕上ミル後段スタンド (6Hi) の下中間ロールについて行ったものである。

ここで得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ハウジングに作用する衝撃力 P は隙間 δ の 1/2 乗に比例して増大する。



- D_w, D_i, D_o : Diameter of each roll
 Φ_{bi}, Φ_{wi} : Offset angle of each roll
 T_M : Motor driving torque on WR shaft
 T_b : Frictional resistance of BUR mogoil bearing
 T_b' : Frictional resistance of BUR mogoil bearing on WR shaft
 F_r : Tangential force of driving force between BUR and IMR
 G_r : Tangential force of driving force between IMR and WR
 Q : Rolling force
 T_Q : Rolling torque
 F_o : Tangential force of rolling force between BUR and IMR
 G_o : Tangential force of rolling force between IMR and WR

Fig. 9 Principle model of steady roll horizontal force

- (2) 適正な隙間の範囲に対して、隙間が約 4 倍に拡大した状態では、衝撃合力が 30~70% 増大する。

- (3) 適正な隙間の範囲に対して、ハウジング隙間を 0 とできれば、衝撃合力は 60~80% 低減される。

これよりハウジング隙間とパス方向衝撃力の関係が定式化できるが、ロール水平方向力 F を定量化できれば、実圧延機での衝撃力を算定することが可能である。

以下、水平方向力 F の定式化を行った。

モデル化はロール本数が 6 本の 6Hi ミルに対して行う。圧延中のロールに作用する水平方向力は、以下の成分に分けられる。

- (1) ロールを駆動する際にロール間接触部の接線方向に作用するトルク接線力の水平方向成分力
- (2) ロールオフセットによる圧延荷重の水平方向成分力
- (3) WR に作用する材料からの前後方張力による水平方向力

まず、ロール空転時および定常圧延時の力のモデル概念図を Fig. 9 に示す。ロール空転時には各ロール間に作用するトルクの接線方向成分の釣り合い式から水平成分力を定式化すると、(3)~(5) 式として表すことができる。

$$\text{BUR: } R_b = F_r \cos \phi_{bi} \quad (3)$$

$$\text{IMR: } R_i = -F_r \cos \phi_{bi} - G_r \cos \phi_{wi} \quad (4)$$

$$\text{WR: } R_w = G_r \cos \phi_{wi} \quad (5)$$

ここで、水平力の方角は出側方向が正、入側方向が負である。ロール空転時のトルクはほぼ 0 と見なせるので、水平成分力も 0 となる。

定常圧延時には、(3)~(5) 式にロールオフセット角による圧延荷重の水平成分力が加わり (6)~(8) 式となる。

$$\text{BUR: } R_b = (F_r + F_o) \cos \phi_{bi} \quad (6)$$

$$\text{IMR: } R_i = -(F_r + F_o) \cos \phi_{bi} - (G_r + G_o) \cos \phi_{wi} \quad (7)$$

$$\text{WR: } R_w = (G_r + G_o) \cos \phi_{wi} \quad (8)$$

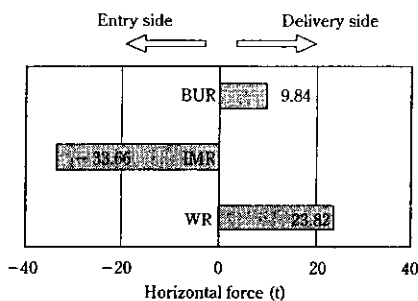


Fig. 10 Horizontal force of each roll at steady rolling

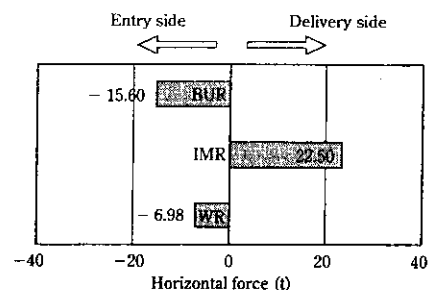


Fig. 12 Horizontal force of each roll at unsteady rolling

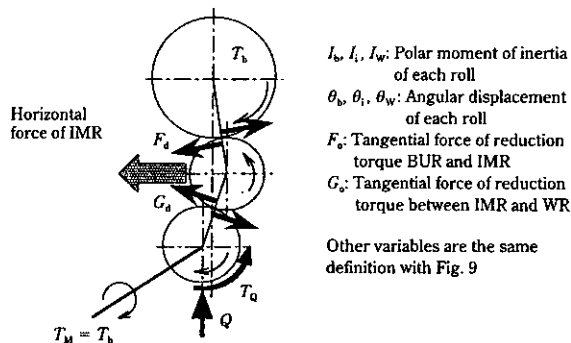


Fig. 11 Principle model of unsteady roll horizontal force

ここで、実機の各ロール径およびオフセット量と平均的圧延荷重値を入力して (6)～(8) により水平成分力を算出した結果を Fig. 10 示す。これより、定常圧延時には WR と BUR が出側方向、IMR が入側方向の水平力を受けることが分かる。

次に、非定常圧延時でのロール水平力を考える。モデルの概念図を Fig. 11 に示す。この場合、材料噛み込み瞬間の各ロールにおける運動方程式を定式化して、仮定として各ロール間にすべりは発生しないとすると、 F_d および G_d はそれぞれ (9)、(10) 式として得られる。

$$F_d = \frac{D_i}{D_w} (T_m - T_q) + \frac{\left(\frac{I_b D_o}{I_b D_i} + \frac{I_w D_i D_b}{I_b D_w^2} \right) T_b}{\frac{D_b}{2} \left(\frac{I_b D_b}{I_b D_i} + \frac{I_w D_i D_b}{I_b D_w^2} \right) + \frac{D_i}{2}} \quad (9)$$

$$G_d = \frac{\left(\frac{I_b D_w}{I_b D_i} + \frac{I_b D_w D_i}{I_b D_b^2} \right) (T_m - T_q) + \frac{D_i}{D_b} T_b}{\frac{D_b}{2} \left(\frac{I_b D_b}{I_b D_i} + \frac{I_w D_i D_b}{I_b D_w^2} \right) + \frac{D_i}{2}} \quad (10)$$

(9)、(10) 式の減速トルクによるロール間作用力の水平成分力が加わり、各ロールの水平成分力は (11)～(13) 式として表すことができる。

$$\text{BUR: } R_b = (F_d + F_r + F_o) \cos \phi_{bi} \quad (11)$$

$$\text{IMR: } R_i = -(F_d + F_r + F_o) \cos \phi_{bi} - (G_d + G_r + G_o) \cos \phi_{wi} \quad (12)$$

$$\text{WR: } R_w = (G_d + G_r + G_o) \cos \phi_{wi} \quad (13)$$

ここで、定常圧延時と同様に諸数値を (11)～(13) 式に入力して水平成分力を計算した結果を Fig. 12 に示す。この図から各ロールの水平力方向は、定常圧延時と反対方向に働くことが分かる。

モデル式による計算結果を以下にまとめる。

- (1) ミル空転時および定常圧延時には、ロールは一定同方向の水平力を受け、片側ハウジングに押し付けられ安定している。

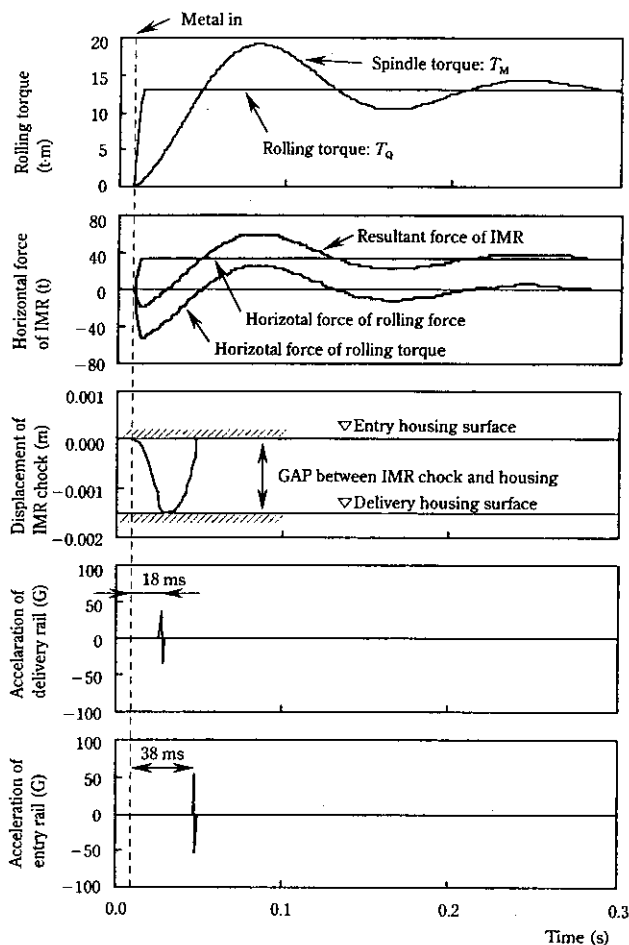


Fig. 13 Simulation of roll displacement and rail acceleration

- (2) 材料噛み込み時の非定常状態では、ロールは定常状態と反対方向の水平力を受け、反対側のハウジングへ押し付けられる。
- (3) 噛み込み終了後定常状態へ移行するとロールは元の方の水平力を受け、移動する。
- (4) (2) (3) の移動によりロールチョックとハウジングは衝突し、その衝撃力はハウジングとチョック間隙間の 1/2 乗に比例する。

この計算結果は、3.1 節で示したロール挙動と衝撃加速度の実測結果を定性的に裏付けるものである。さらに定量的な比較を行うため、非定常圧延時での IMR 水平力、ロール挙動および組替レール振動加速度をシミュレーションした結果を Fig. 13 に、組替レールの振動加速度値の計算と実測の比較を Fig. 14 に示す。

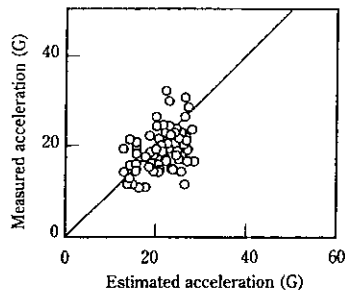


Fig. 14 Comparison of calculated and experimental acceleration at roll changing rail

材料噛み込み後、組替レールが受ける振動加速度は、発生までの所要時間、絶対値ともに実験結果とほぼ同等の結果が得られた。Fig. 14 の結果からもほぼ定量的一致をみることができるので本モデルによりパス方向衝撃力を定量化することは可能と言える。

また、衝撃力低減のためにはチョックの挙動安定、すなわちハウジングとチョック間の隙間をなくする、あるいは長期間隙間を小さく維持することが必要であることが示された。

4 非定常負荷低減のための設備技術

4.1 改善前の構造と問題点⁵⁻⁷⁾

水島製鉄所熱間圧延工場仕上ミル前段のWRシフト装置は、スライドベンディングブロック方式を採用していた。この構造は、Fig. 15 (a) に示すように、ベンディングブロックがWRシフトの際、ロールと追従してシフト方向にスライドするものである。本方式の利点として、ロールとベンディングブロックの相対的位置関係が常に一定しているため、ロールネックベアリングにオフセット荷重が作用しない。したがってシフトストロークを比較的大きく設計できるので形状制御能力に優れる。しかしながら欠点としてベンディングブロック背面が摺動面となるため、この部位の摩耗劣化速度が大きいという問題があった。背面の摩耗劣化が進むとロールチョックとベンディングブロック間の隙間が拡大し、ロールパス方向の非定常負荷が増大し、ベンディングブロック付属機器などの故障が発生する危険性が高まる。

4.2 改善後の構造

この問題解決のためFig. 15 (b) に示すベンディングブロック固定式WRシフト構造への改造を実施した。ベンディングブロックを固定することでロールとシフトシリンダの連結媒体として新規にシフトブロックを設置したが、本ブロックに圧延スラスト力によるモーメント荷重が発生しないよう構造設計⁹⁾を工夫した。また、WRネックベアリングに作用するオフセットベンダ荷重に対しては新たにオフセット荷重許容型ベアリングを開発^{9,10)}・適用し、所要の形状制御能力を維持することを可能とした。これによりベンディングブロック背面の摺動摩耗は根絶され、ウィンドウ幅精度の維持および非定常衝撃力の大幅低減を可能とした。改造後はロールチョックとベンディングブロック間が摺動面となるが、本摺動面には取替容易はライナを配することで保全負荷を低減している。改造による効果

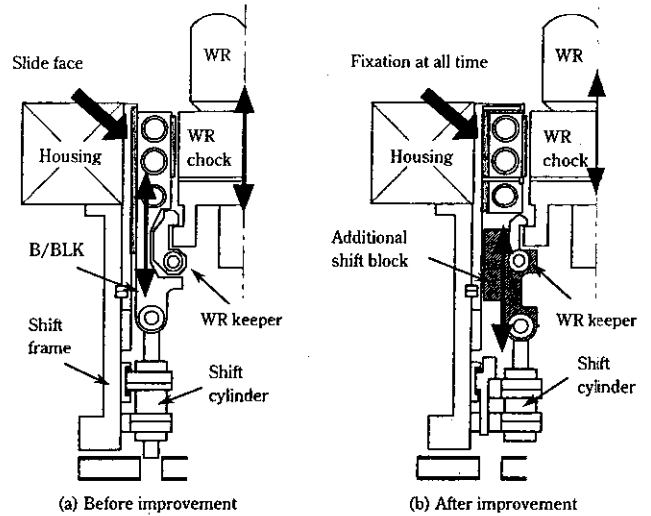


Fig. 15 Structure of WR shift

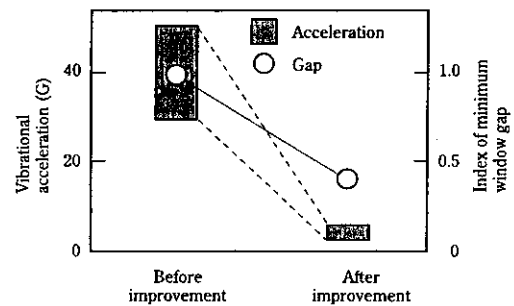


Fig. 16 Comparison of vibrational acceleration and accuracy of housing window

はFig. 16 に示すように従来ベンディングブロック本体に30~40Gの振動加速度が発生していたのに対して、改造後は2~5Gまで低減した。この改造にともない、ウィンドウ幅管理基準の見直しも行い、改造後は従来の半減以下に厳格化した。これにより通板性の改善にも寄与した。

5 結 言

熱間圧延プロセスにおける材料噛み込み時の非定常圧延領域でのロールパス方向衝撃力の問題に対し、力学的アプローチによる理論的検討の結果から以下の知見および効果を得た。

- (1) 定常・非定常ロールパス方向力学モデルの定式化により、圧延状態でのロール挙動とロールに作用するパス方向力を定量化した。
- (2) 隙間をパラメータとしたパス方向衝撃力の影響評価式により、隙間と衝撃力の関係を明らかにした。
- (3) パス方向力の発生は圧延力学特性上不可避であるため、衝撃力低減のためには隙間の厳格化が有効な手段であることを理論的に示した。
- (4) 仕上ミルWRシフト装置の改造により、パス方向衝撃力の大幅低減を可能にした。

参 考 文 献

- 1) 大森舜二：工学博士論文集，(1988)
- 2) 日本鉄鋼協会：「板圧延の理論と実際」
- 3) 本城 恒，新谷定彦，豊田武司：石川島播磨重工技報，6 (1977), 558
- 4) 日本鉄鋼協会 圧延設備分科会：第 13 回圧延設備分科会資料，圧設 13-3-3 (1970)
- 5) 紺野洋司，中野貞則，高木 清，田中伸治，小川正一，川路泰弘：材料とプロセス，11 (1998), 992
- 6) 小笠原信夫，岡本浩志：日本設備管理学会秋期研究発表大会，(1998), 7
- 7) 田中伸治：日本鉄鋼協会 圧延設備分科会，設 59-自-1 (1998)
- 8) 川崎製鉄(株)：特開 2000-042612
- 9) 川崎製鉄(株)，日本精工(株)：特開 2000-071005
- 10) 光洋精工(株)，川崎製鉄(株)：特開 2000-081035