

マルチボディダイナミクスによる 厚板剪断ライン搬送シミュレーション

Simulation of Meandering Behavior of Steel Plate by Multi-Body Dynamics

廣池承一郎	HIROIKE Shoichiro	JFE スチール	スチール研究所	機械研究部	主任研究員 (副課長)
小原 祐司	OHARA Yuji	JFE スチール	スチール研究所	機械研究部	主任研究員 (課長)
山下 浩二	YAMASHITA Koji	JFE スチール	スチール研究所	機械研究部	主任研究員 (副部長)

要旨

厚板剪断ラインにおける蛇行現象を評価可能な搬送シミュレータを開発した。本シミュレータでは厚板と搬送ピンチロールの相互作用に着目し、ピンチロールの周速、圧下力、回転位相差、アライメントを蛇行の要因としてモデル化した。それぞれの蛇行要因の影響を評価した結果、ピンチロールの回転位相差とアライメントずれが蛇行に大きな影響を与えていることを明らかにした。

Abstract:

Plate meandering simulator was developed by multi-body dynamics technology which evaluates meandering behavior in actual plate shear line. Plate is pinched near the both edges in width direction and transported by several pairs of pinch rollers (P/R). Focusing on the interaction between P/R and the plate, influence of P/R velocity, pinching load, phase and alignment to meandering behavior was estimated by simulator and verified by measurement. It was revealed that major meandering factors at the plate shear line are the phase difference and the misalignment of the pinch rolls.

1. はじめに

近年、製造業における生産ラインの省力化・効率化が急速に進められており、加工から組み立て、検査、梱包、出荷といった各工程はもとより、工程間の搬送に至るまで自動化が求められている。その際に重要となってくる技術として、製品・半製品の高速・高精度の位置決め・搬送技術があげられる。これらはレーザー距離計・画像認識装置に代表されるセンシング技術やサーボ制御による搬送技術などにより、近年目覚ましい進歩を遂げている¹⁾。しかし、搬送対象や設備制約上の理由で、正確な搬送が困難となり、いわゆる蛇行現象が生じる場合がある。

たとえば、厚鋼板の製造プロセスには、オーダーに応じた寸法に鋼板を切断加工するためダブルサイドシャー (DSS) をはじめとした鋼板剪断ライン²⁾が存在する。この剪断ライン内では鋼板の幅方向両端部をピンチロール (P/R) で上下に挟圧しながら P/R を回転させることにより鋼板の搬送を行う。鋼板は一定距離搬送されると停止し、DSS により幅方向両端部が切断される。このような搬送と切断を繰り返しながら鋼板の製品形状を造り込む。しかし、鋼板搬送

中に蛇行現象が発生すると、鋼板の幅方向両端部での切断量が不均一になるなどの品質不良を発生させる。そのため鋼板剪断ラインでの蛇行防止技術は重要である。

鋼板搬送設備における蛇行制御に関しては、P/R の圧下力調整や速度調整といったソフトウェアによる制御と P/R の据え付け精度や摩耗量管理といった機械精度管理などのハードウェア面での対策が用いられている。これは P/R と剪断設備を含めた全長十数 m にわたる搬送系の中で、蛇行の経時変化を定量的に予測できるシステムが確立していないためである。たとえば圧延ロールと鋼板間の蛇行現象については多くの報告がなされており^{3,4)}、また、搬送ロールと薄鋼板間の蛇行現象についても報告されているが⁵⁾、変形を伴わない厚鋼板と P/R 間の蛇行現象については報告が少なく、実験的に蛇行現象のメカニズムを解明しようとする試み⁶⁾がなされている程度である。

そこで本報告では、マルチボディダイナミクス技術⁷⁾により厚板剪断ラインにおける実用的な搬送シミュレータを開発し、蛇行問題における各種要因の影響評価を行った。

2. 解析モデル

2.1 マルチボディダイナミクスによるモデル化

実用可能な搬送挙動の解析シミュレータを開発するためにマルチボディダイナミクス (MBD) 技術を適用した。MBDとは剛体, ばね, ジョイント等の機械要素をコンピュータ上に構築し, 動力学シミュレーションを行う手法のことで, 利点として①汎用的に接触状態を扱うことができること, ②システム全体の動きをアニメーションで視覚的に確認できることがあげられる。

図1に今回対象とした厚板剪断ラインの概要を示す。対象材を上下に狭圧しながら搬送するピンチロール (P/R) と鋼板から構成される本モデルにより, 実ライン設備相当の機械要素を再現している。実際のラインでは, 鋼板の幅幅に応じて各P/R及びシャーナイフの間隔も幅方向に変化することから, 本モデルでも幅幅に応じて左右P/R間隔を決定している。ここでP/Rでの間隔調整は片側が固定で, もう片側は移動する構造であり, 幅方向に動く側を「移動側」, 動かない側を「固定側」と区別している。図1では鋼板の搬送方向に沿って左側が固定側, 右側が移動側となる。鋼板は剛体として取り扱い, さらに, 剪断時の鋼板はP/Rによって十分に固定されているものとし, シャーナイフと鋼板の接触による位置ずれは考慮しない。

2.2 鋼板の蛇行要因

鋼板の蛇行要因を表1に示す。

- ① P/R 周速: 左右の P/R 間で摩耗差による径差が生じると周速差が生じ, その結果, 鋼板と P/R のスリップを引き起こす。
- ② 圧下力: 左右 P/R で圧下力の差により, 片側の P/R で十分に鋼板を拘束できなくなった場合に蛇行要因となる。
- ③ 左右 P/R の回転位相差: ①と同様に P/R と鋼板間でスリップを発生させる原因となっている。本来, 下 P/R の左右は連結軸で繋がれた構造であり回転位相は一致しているが, 軸のねじれ等により回転位相差が発生する。
- ④ P/R アライメントずれ: 経年による据付精度の悪化に

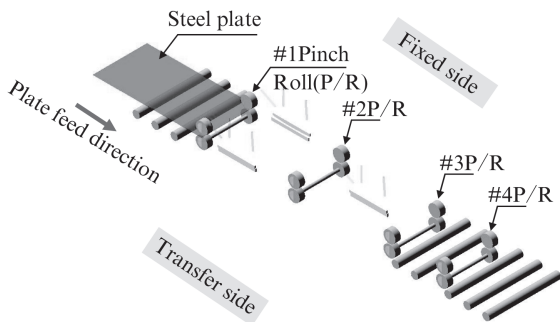


図1 厚板搬送ラインのシミュレーションモデル
Fig. 1 Simulation model of steel plate at carrier line

表1 厚板搬送ラインの蛇行要因

Table 1 Meandering factor of steel plate at carrier line

Asymmetry of P/R	Factor
① Velocity	Reduction of roll diameter by abrasion
② Load	Miss setting of hydraulic pressure
③ Phase difference	Backlash at connecting rod
④ Alignment	Deterioration of setting accuracy due to aging

表2 解析条件

Table 2 Analysis condition

Steel plate size	
Length	6 000 mm
Width	4 000 mm
Thickness	10 mm
Friction between P/R and Steel plate	
Static friction coefficient	0.35
Dynamic friction coefficient	0.25

より生じており, 鋼板の送り方向に影響することから蛇行要因となる。

そこでそれぞれの蛇行要因についてシミュレータによる定量評価を行った。

3. 解析条件

3.1 搬送対象

表2に解析条件である鋼板の寸法およびP/Rと鋼板間の摩擦係数を示す。鋼板寸法は蛇行が比較的しじやすい短尺, 薄厚材を設定した。また鋼板とP/Rの摩擦係数は, 静止摩擦係数を0.35, 動摩擦係数を0.25とした。

3.2 鋼板の搬送速度パターン

図2に解析で使用するP/R周速度のパターンを示す。最大周速度 V_{top} , 加減速周期 T_1 とした場合の単純なサインカーブでモデル化した。これは, 本搬送ラインが一定距離間隔で鋼板を搬送し, その後停止した状態で剪断を行うためである。実際には剪断時にP/R駆動は完全停止するが, 本解析ではシャーナイフと鋼板の接触は考慮していないため, 速度変化を連続的に扱うこととした。上P/Rは駆動軸を持たないアイドル状態で, 下P/Rのみ駆動ロールかつ左右連結構造であることから, 本モデルにおいてもそれに準じ, 上P/R

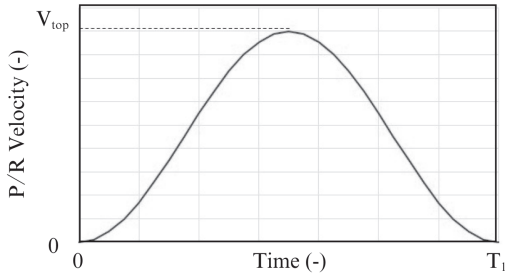


図2 P/Rの速度パターン
Fig. 2 P/R velocity pattern

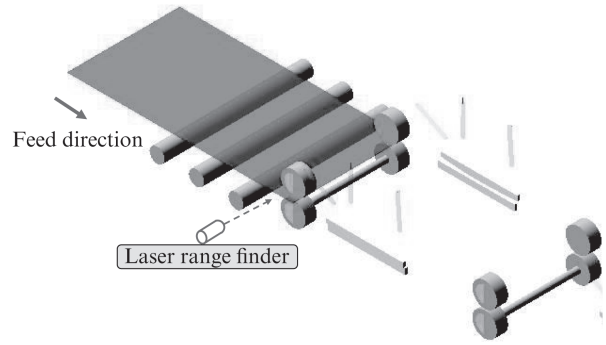


図4 蛇行量の測定
Fig. 4 Measurement of meandering

は駆動を持たず、鋼板との摩擦抵抗により従動するモデルとした。

3.3 圧下力モデル

図3にP/R圧下力モデルを示す。鋼板に対するP/Rの圧下力はシリンダ圧力とP/R構造から算出した。さらに鋼板とP/Rの接触を弾性接触とし、オーバーラップ量λに応じた反発力をP/R圧下力として扱っている。

4. 解析結果

4.1 実測蛇行量と解析結果の比較

シミュレータの評価を行うため、実際の鋼板の実測蛇行量と解析結果との比較を行った。測定装置には図4に示すような反射型レーザー距離計を用いた。レーザー距離計のセンサヘッドを移動側 #1P/Rの入側に設置し、搬送中の鋼板側面の距離変位を実測蛇行量として測定した。

実測蛇行量とシミュレータによる解析結果との比較を図5に示す。実挙動データに関しては測定器への振動影響を除外するため前後40点で平均化を行っている。実測蛇行量については移動側への蛇行が顕著である。解析データでも同様の傾向が見られ、蛇行傾向は実現象と概ね一致している。以上から本シミュレータが鋼板蛇行の実挙動を再現してい

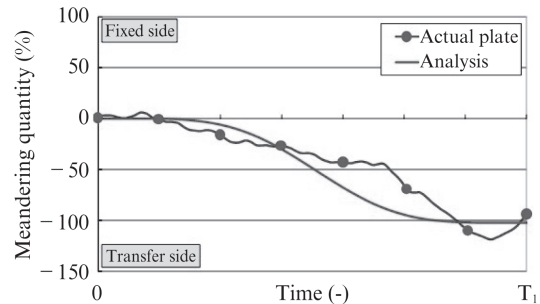


図5 実際の蛇行量と解析との比較
Fig. 5 Comparison between real meandering and analysis

ることが確認できた。

4.2 単一の蛇行要因を与えた場合の蛇行挙動

実際の蛇行現象は複数の要因が重なり合った複合現象であるため、単一の蛇行要因に対する代表的な蛇行挙動について解析と考察を行った。本解析では極めて単純なケースとして、移動側の全てのP/Rに蛇行要因を付与し、解析を行った。蛇行要因となる各パラメータは蛇行現象が顕著に確認できる程度とする。図6に各要因となる①周速差、②圧下力差、③回転位相差、④アライメントずれによる蛇行挙動を示す。縦軸が鋼板搬送方向における板幅方向の蛇行量であり、板の先端と尾端をプロットしている。①周速差、②圧下力差、③回転位相差に関しては、回転を伴う蛇行現象が生じているのに対して、④アライメントずれに関しては回転を伴わず、板の姿勢を保持したまま蛇行が生じている。

また圧下力差、回転位相差における蛇行は、鋼板の長手方向で複数段のP/Rに拘束されない状態で顕著に現れ、P/Rの加減速に同期したスリップ現象が蛇行発生要因となっている。

一方、周速差とアライメントずれに対しては、拘束するP/Rの数やP/Rの加減速に影響されない。

以上より、本解析により求められた蛇行現象は、圧下力差および回転位相差に見られるP/Rの加減速周期に同期した蛇行挙動と、周速差およびアライメントずれに見られる単

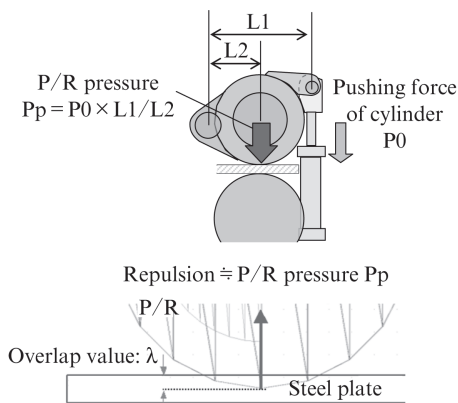


図3 P/R圧下力と接触条件
Fig. 3 P/R pressure and contact condition

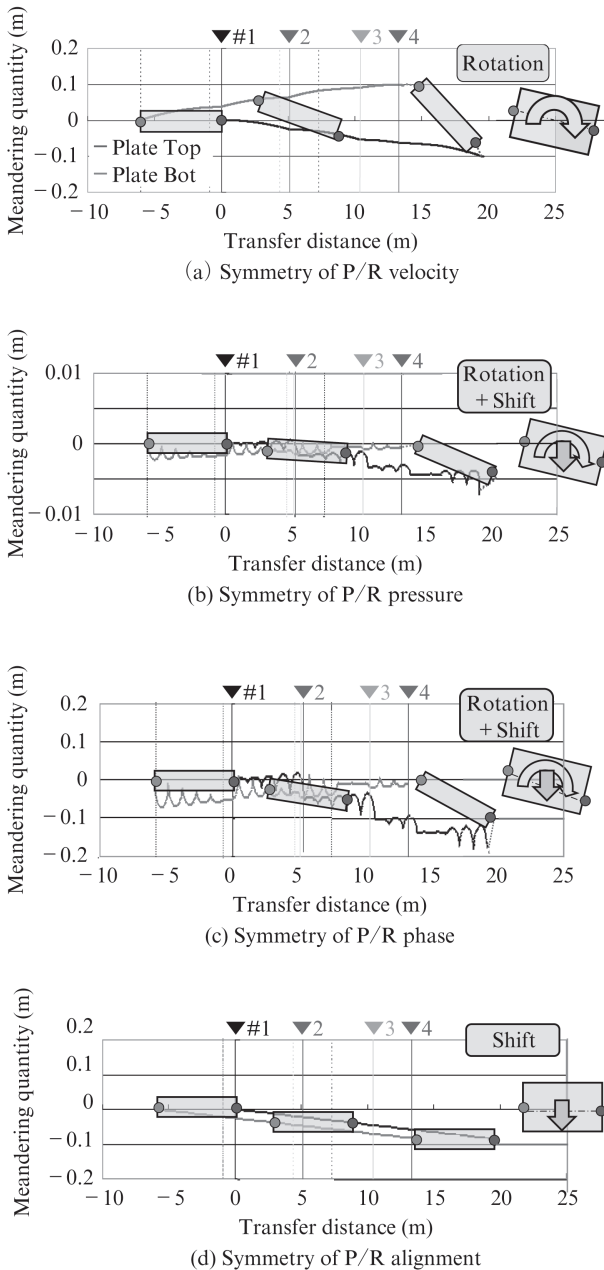


図6 各要因に対する蛇行挙動

Fig. 6 Meandering behavior for each factors by analysis

調変化的な蛇行現象の二つに分けられる。

5. 考察

5.1 周期的な蛇行現象

P/R 圧下力差による蛇行現象は、鋼板の板幅方向片側を拘束している P/R の圧下力が小さくなることにより、P/R と鋼板間でスリップが生じ、回転運動が発生する。この際、P/R は周期的に加減速を繰り返すことから、加速時と減速時で逆のモーメントが鋼板に作用する。このため、圧下力差によって生じる蛇行現象は P/R の加減速周期 T_1 に応じて増減を繰り返す。そのため、蛇行量はある程度相殺されるこ

ととなる。しかしながら、蛇行が相殺しきる前に次の P/R に挟圧されると、鋼板は回転しなくなるため、蛇行量が固定されてしまうこととなる。

P/R 回転位相差による蛇行現象は、加速時には位相が遅れた側の P/R 周速が遅くなり、固定側から移動側へ回転モーメントが生じるが、減速時には逆に位相が遅れた側の P/R 周速が大きくなるため移動側から固定側へ回転モーメントが生じ、鋼板の蛇行量は圧下力差の場合と同様に P/R の加減速周期に応じて増減を繰り返す。また、圧下力差の場合と異なり、複数段の P/R に挟圧された場合でも鋼板の回転は生じ続けていると考えられる。

5.2 単調変化的な蛇行現象

P/R 周速差は、P/R の加減速に関わらず常に片側の周速が大きい状態を維持し続けることから、発生するモーメントの向きも常に一定であるため、鋼板の先端と尾端が逆方向に蛇行し回転する。

P/R のアライメントずれは、P/R の加減速とは関係がなくモーメントが生じないことから回転運動は発生せず、アライメントの向きに平行した蛇行が生じている。

5.3 蛇行量に対する P/R 要因の定量評価


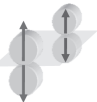

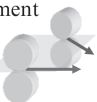
P/R の加減速周期 T_1 の間に生じる蛇行量が 1 mm となる際の各要因の解析値を表 3 に示す。

P/R 周速差による蛇行量が 1 mm 以上となるためには左右 P/R で 0.07% の周速差が必要である。周速差は P/R が経時摩耗することにより径差が生じる。仮に P/R の直径が 500 mm であった場合、左右 P/R で 0.07% の周速差が発生する径差は 0.35 mm となる。これは蛇行要因として一見大きいように見られるが、実際には摩耗により左右 P/R の径差が生じた場合、摩耗量が少ない側の P/R は周速が大きくなるため鋼板との摩擦による負荷が大きくなり、摩耗差は相殺される関係にある。そのため実際の P/R の摩耗差は非常に小さいオーダーであり、蛇行量への影響も小さい。

P/R 圧下力差による蛇行量が 1 mm となるためには左右 P/R で 17% の圧下力差が必要である。圧下力差が発生する要因は油圧設定であるため、意図的に設定しない限り、このような圧下力差が生じることはない。そのため、圧下力差が蛇行に与える影響は小さいと考えられる。

P/R 位相差による蛇行量が 1 mm となるためには左右 P/R で 0.003 s の位相差が必要である。位相差が生じる要因は回転モータの同期性をはじめ複数の要因が考えられるが、近年ではインバータ制御技術の発達により高精度の同期性を確保している。しかしながら、P/R の駆動方式が片側のみモータ駆動であり、対となる P/R は連結軸で従動する方式の場合は、連結軸のねじれや連結部の摩耗等により同期ずれが生じるため、位相差が大きくなり、蛇行への影響も大きくなる。

表3 蛇行量 1 mm となる P/R 要因の定量評価 (解析値)
Table 3 Analytical results of each factors at meandering quantity 1 mm

Meandering factor	Difference between Left and Right P/R
① Velocity 	0.07%
② Load 	17%
③ Phase difference 	0.003 s
④ Alignment 	0.002°

P/R アライメントによる蛇行量が 1 mm となるためには左右 P/R で 0.02° のアライメントずれが必要である。アライメントずれは経年による据え付け誤差により生じると考えられる。特に鋼板の搬送ラインは大きな圧下力をかけながら加減速を繰り返すことからずれが生じやすく、また、ずれが生じた際の修正自体も困難であることから、最も蛇行に対して影響を与える要因と言える。

6. おわりに

本稿では厚板剪断ラインにおける鋼板の搬送挙動を評価できる搬送シミュレータを開発し、蛇行現象における影響要因を定量的に評価することで以下を明らかにした。

(1) 剛体要素の鋼板とピンチロール間を弾性接触モデルと

し、接触によるオーバーラップ量に応じて反発力を発生させることで、両者の相互作用を簡易に表現できる。

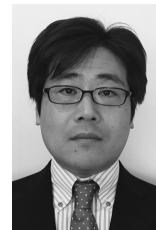
- (2) 鋼板とピンチロールにおける動的な力のつり合いをマルチボディダイナミクス技術で表現することにより、複数のピンチロールが介在する厚板剪断ラインの蛇行挙動を定量評価できる。
- (3) 厚板剪断ラインにおける鋼板蛇行要因として、ピンチロールの周速、圧下力、回転位相差、アライメントに着目、実ラインの設備状態を解析条件としたシミュレーション結果は、実測の蛇行挙動とおおむね一致する。
- (4) 厚板剪断ラインにおける鋼板蛇行要因に関して、単一の蛇行要因だけを外乱として付与した搬送シミュレーション結果から、ピンチロールによる左右の回転位相差とアライメントずれが最も蛇行へ影響する。

参考文献

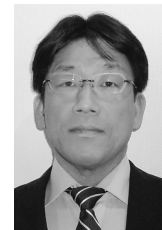
- 1) 伊村信也. 産業機械. 2015, vol. 774, p. 22.
- 2) 柳政宏. 産業機械. 2012, vol. 737, p. 22.
- 3) 鷲北芳郎, 伊勢居良仁, 武衛康彦, 相原康宏, 竹田真琴. 新日鉄住金技報. 2015, vol. 401, no. 2, p. 11.
- 4) 鈴木規之, 菊地あつし. 材料とプロセス. 1992, vol. 5, p. 145.
- 5) 石垣雄亮, 西名慶晃. 日本機械学会論文集. 2013, vol. 808, p. 4667.
- 6) 羽田憲治, 木宮康雄. 材料とプロセス. 1990, vol. 5, p. 1469.
- 7) 宮本岳史. Railway Research Review. 2008, vol. 65, no. 10, p. 2.



廣池 承一郎



小原 祐司



山下 浩二