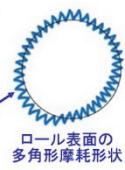
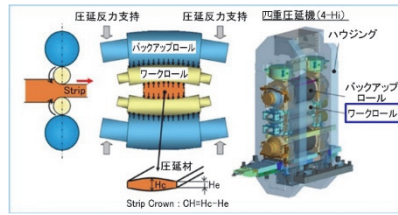


ワークロール多角形摩耗を防ぐ： 圧延機の機構・振動・摩耗の連成挙動予測モデルの構築

Preventing Polygonal Wear of Work Rolls:
Construction of Prediction Model for Coupled Behavior of
Mechanism, Vibration and Wear of Rolling Mill



アロウラ ロヒット*¹
Rohit Arora

今岡 健悟*²
Kengo Imaoka

影平 喜美*³
Kiyoshi Kagehira

川内 章央*⁴
Akihisa Kawauchi

圧延機のワークロールでは自励振動による多角形摩耗が発生する現象が知られている。本現象の対策を検討するには、圧延機の固有振動数を特定し、実運転中の振動を評価する必要がある。そこで本報では、ワークロールの多角形摩耗につながる圧延機の運転時振動モード推定のために、MBD (Multi Body Dynamics) と圧延理論及び摩耗モデルを連成させたシミュレーションモデルを開発した⁽¹⁾。本モデルは、四重圧延機 (4-Hi) のダイナミクスモデルを考慮した運転中の圧延機挙動と摩耗進展を同時に評価できるものである。これにより、ロール摩耗の原因となる振動モードを特定し、構造変更やダンパーの設置、監視センサの設置など予防措置の検討が可能となった。

1. はじめに

圧延機のワークロールでは多角形に摩耗する現象がみられる。同様の事象は、鉄道車輪や自動車タイヤなどの他の回転系でも観察されている。多角形摩耗は、滑りによる摩耗が一回転後に接触力にフィードバックされる時間遅れが原因の自励振動によって発生し、プロセスの不安定化を引き起こす。多角形摩耗が生じると圧延後の製品品質に影響を与えるため、通常のメンテナンスと異なるタイミングでロール交換が発生する。これはお客様の生産スケジュールへ大きなインパクトとなるため、自励振動を引き起こす圧延機の固有振動数を同定して多角形摩耗を防止することが必要である。

一方で、圧延機は複雑な系であり多数の固有値が存在する。また、圧延機の固有振動数は複数存在するので、通常の固有モード解析だけではどの振動数が多角形摩耗に関与しているか同定が困難である。これらの課題に対処するため、MBD (Multi Body Dynamics) を用いた連成シミュレーションモデルを開発した。このモデルは、四重圧延機 (4-Hi) のシステムダイナミクスモデルにフォン・カルマン圧延モデルと Archard 摩耗則を統合し、実機挙動を精緻に再現可能としたものである。

2. 解析モデル

2.1 四重圧延機 (4-Hi) のマルチボディダイナミクスモデル

今回の解析対象である四重圧延機 (4-Hi) の構成を図 1 に示す。圧延材を圧延するワークロール 2 本と圧延反力を支持するバックアップロール 2 本の合計 4 本のロールより構成され、厚板、熱間及び冷間圧延帯板ら板材圧延に広く利用されている。今回は熱間圧延機を対象とした。

商用 MBD ソフトウェア (ADAMS) を用いた精緻な非線形 MBD モデルを作成した。図 2 にモデ

*1 三菱重工業株式会社 総合研究所 機械研究部

*2 三菱重工業株式会社 総合研究所 機械研究部 主席研究員 技術士(機械部門)

*3 Primetals Technologies Japan 株式会社 技術開発部 主席技師

*4 三菱重工業株式会社 総合研究所 知能化機械研究推進部 主席研究員

ル構成を示す。モデルには以下の要素を含む。

- ・ハウジング: 振動モードを取り込むことで弾性変形を模擬可能な形でモデル化
- ・ロール: Timoshenko 理論に基づく Beam 要素としてモデル化
- ・軸受: 軸と軸受間のクリアランス及び荷重に対して非線形な剛性曲線を考慮した非線形要素としてモデル化
- ・ロール間接触力: Hertz 接触モデルを用いて計算
- ・リフティングシリンダの油圧アクチュエータ: 油圧のばね特性などを考慮してモデル化
- ・圧延モデル: 圧延時にロールバイト(材料を整形するためのロール)に作用する荷重は材料の塑性変形及び摩擦を考慮して圧延圧力分布・圧延荷重を導出可能なフォン・カルマン圧延モデル⁽²⁾に基づき計算する。具体的には三菱重工業株式会社開発のロールバイト計算ツールを本 MBD モデルに統合する形で実現した。フォン・カルマン圧延モデルのイメージと単純形状による MBD モデルとの統合検証結果を図 3 に示す。

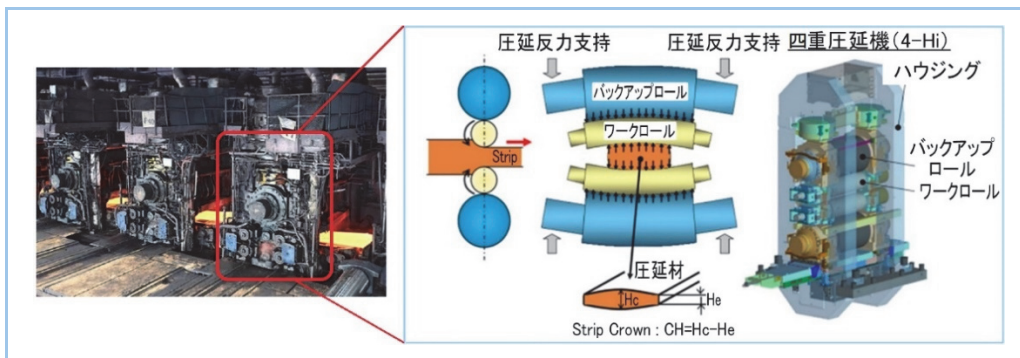


図1 四重圧延機(4-Hi)の構成

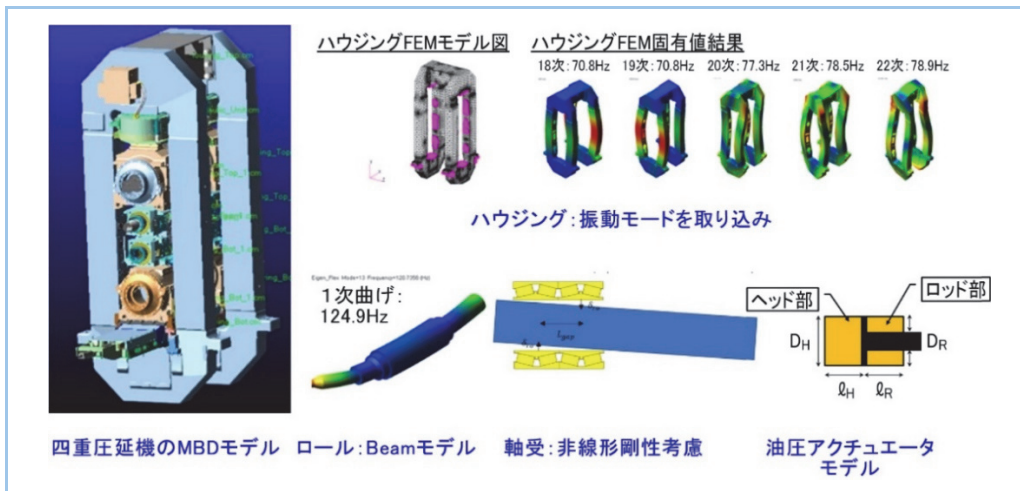


図2 MBD モデル構成

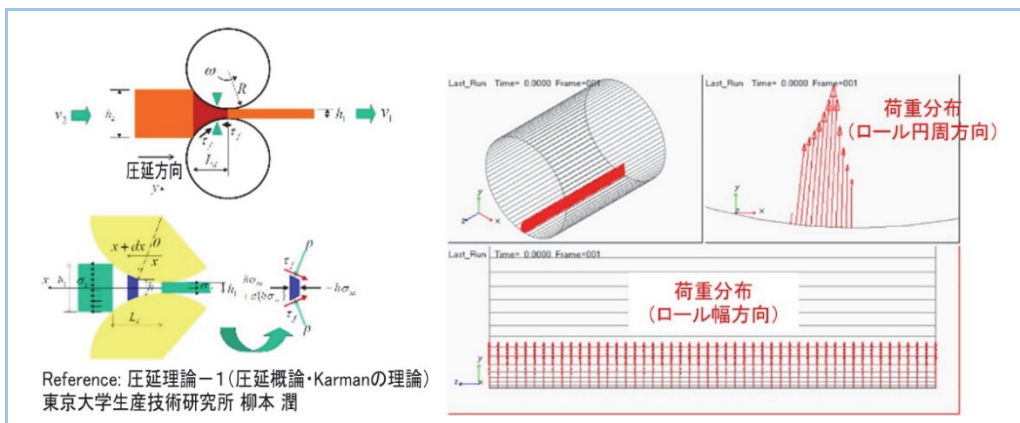


図3 フォン・カルマン圧延モデル概要と MBD モデルへの統合例

2.2 固有振動数解析

防振対策の対象モードを絞り込むため、2.1 節で構築したモデルを用いて圧延条件での固有振動数解析を実施した。しかし、対象となる圧延機が複雑な系であるため多数の固有値が存在し、固有モード解析だけでは多角形摩耗を引き起こすモードを絞り込むことが困難であった。一例として 100Hz 以下の固有振動モードを図 4 に示す。

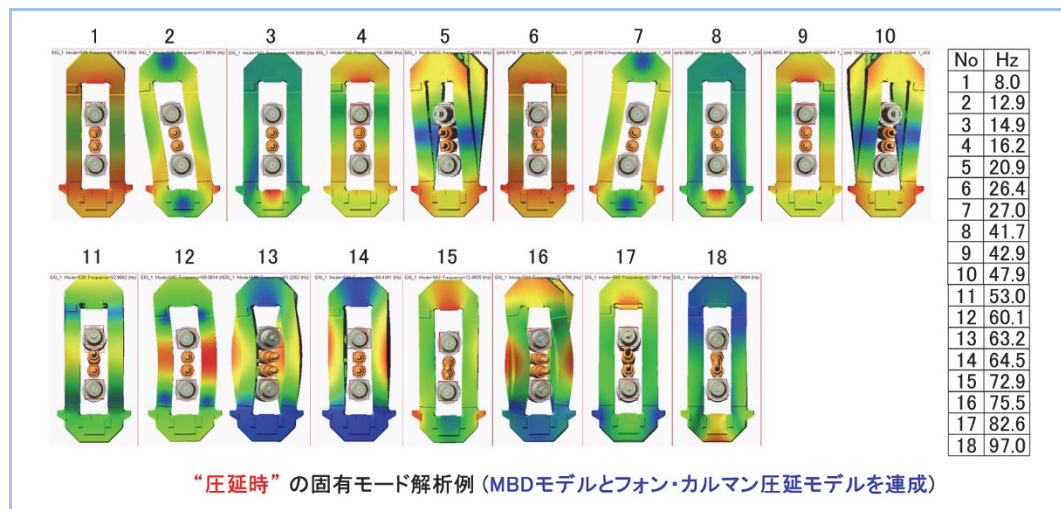


図4 圧延機の固有モード解析結果

2.3 連成動的シミュレーション

多角形摩耗形状と固有振動数の関係については、文献や過去の知見などから以下のことが分かっている。

- ① ロールバイトに対する圧力変動がない場合、摩耗は均一で円形となる。
- ② ロールの垂直振動により動的圧力変動が生じる場合、多角形摩耗が発生し、多角形の辺数は振動周波数と回転周波数の比率に依存する。多角形摩耗の成長条件は近似的に下式で表される。

$$f_r \times N \approx f_n$$

(f_r : ロール回転速度, N : 多角形の辺数, f_n : 固有振動数)

このため、2.1 節で構築したモデルと Archard 摩耗則⁽³⁾を連成させ、多角形摩耗形状を予測可能な連成解析モデルを構築し、多角形摩耗形状から対象振動モードを絞り込む解析を実施することとした。

3. 解析結果と考察

3.1 動的摩耗シミュレーション結果

連成 MBD モデルを用いてワークロールを 1.5Hz で定速回転させる非定常圧延解析を実施した。その結果、多角形摩耗は時間につれて増大し、ロール形状が 40 辺の多角形に近づく飽和した。この時、ワークロールが水平振動し、バックアップロールが垂直振動する様子が見られた。結果を図 5 に示す。

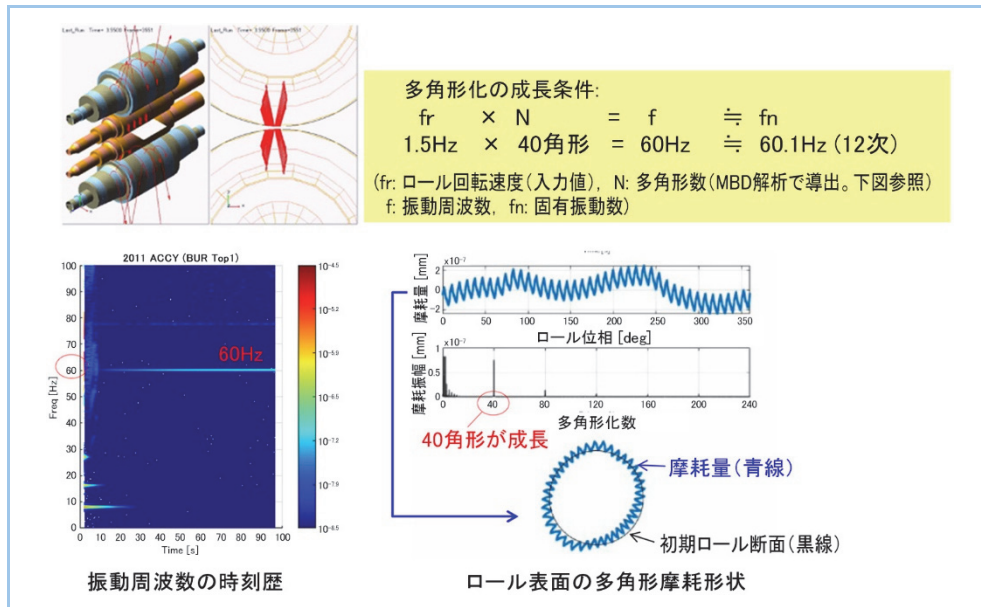


図5 MBD 圧延機モデルを用いた非定常圧延解析結果

3.2 モード同定

3.1 節の結果を 2.3 節に示した多角形摩耗の成長条件に当てはめると、

$$f_r(1.5\text{Hz}) \times N(40 \text{ 角形}) \approx 60\text{Hz}$$

となる。この周波数に最も近い運転時モード形状を確認し、約 60.1Hz の 12 次モードが多角形化の原因であると予想した。同定した固有振動モードを図 6 に示す。この 12 次組立モードは鋼板圧延方向のハウジング全体曲げモードを含むため、ワークロール間に垂直荷重変動と水平振動が生じる。この変動が原因で滑りを引き起こし、多角形摩耗を生じると考えられる。

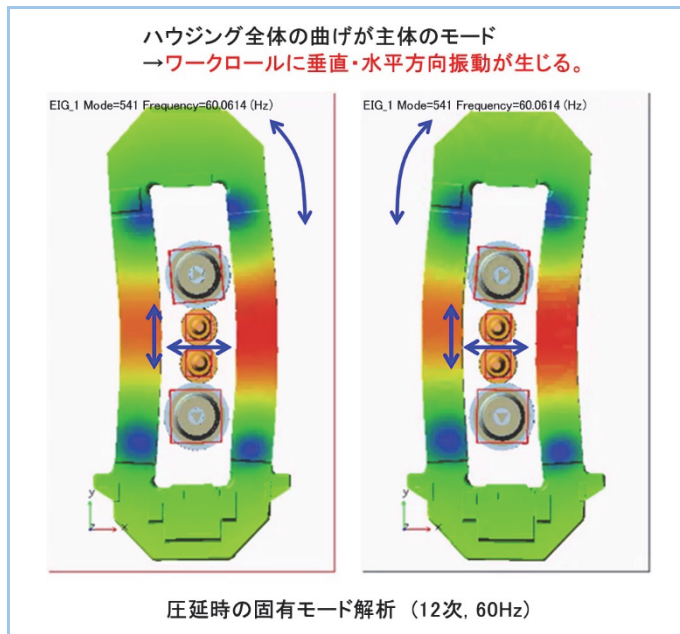


図6 多角形摩耗の要因となる固有モード同定

3.3 対策案導出

これまでの検討により原因モードを同定できたことで振動が大きい箇所や周波数帯が明らかに。このため、構造変更、ダンパー設置、または監視センサの配置などの予防措置を適切に講じることができる。

4. まとめ

圧延機ロールの多角形摩耗についてロール諸元(寸法形状, 質量, 剛性)及び支持剛性の機構構造の剛性及び振動特性とフォン・カルマン圧延モデル及び Archard 摩耗則を連成した精緻な MBD 解析モデルを構築した。上記モデルによるシミュレーションで多角形化を再現し, また多角形化の要因となる振動モードを特定する事ができた。これにより多角形化の防振対策の考案が可能になる見込みを得た。

今後, 実機における振動挙動計測とその結果を基にした MBD 解析モデルのコリレーションにより, シミュレーション結果の妥当性検証や予測精度向上が可能であると考ええる。シミュレーションの予測精度を向上することで具体的な防振対策(減衰機構の検討や対策の施工箇所)が検討可能になるとともに, モデルを他機種や新規設計に反映することで高品質な製品設計や故障を未然防止するメンテナンスタイミングを検知するモニタリングシステムの提案が可能になると考える。

参考文献

- (1) Arora, R. et al., Dynamic Analysis of Coupled Vibration Instability in Rolling, 12th ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics (2025)
- (2) 柳本 潤, 圧延理論－1(圧延概論・Karman の理論),
<https://www.cem.t.u-tokyo.ac.jp/?materialtype=textbook>
- (3) J. F. Archard, J. Appl. Phys, 24, 981 (1953)