

学位論文題名

鉄鋼業における生産性最大化のための振動制御および 振動利用技術に関する研究

(Study on Vibration Control and Application Technology to Maximize
Productivity in Steel Industry)

学位論文内容の要旨

近年、東南アジアを中心とした経済成長による鉄鋼需要の増大と世界的業界再編に伴い、鉄鋼業におけるグローバル競争は激化している。この競争を勝ち抜くには、生産性の最大化が有力な対策となり、そのためには、高い品質と低い製造コストを達成しつつ、製品の安定供給を実現する技術の確立が求められる。

製鉄プロセスにおいては、大型の機械設備を用いて鋼板や鋼管等を製造するが、ライン速度を上げて生産量を増やそうとすると、製造設備の機械振動が増大し、製品の品質が低下する傾向がある。すなわち、ライン速度と品質は一般にトレードオフの関係にあるので、高い品質を確保するために、通常はライン速度に制約を設けており、これが生産性を阻害している。

このように、製造設備の振動は製品の品質に悪影響を与えるマイナスの要因と扱われることが多いが、一方で振動を有効利用してプラスの要因にする技術 (連続鋳造鋳型加振による鋳片引き抜き容易化等) も存在し、その拡大が期待されている。

そこで本研究では、振動工学の観点から、高品質・低コスト・安定供給そして高生産性を追及する技術開発として5つのテーマに取り組んだ。振動制御および振動利用技術により、振動起因品質欠陥の抑制・振動起因ライン速度制約の解除・安定操業の確保・設備稼働率の向上を行い、鉄鋼業における生産性最大化を達成することが本研究の目的である。

第2章では、自動車等に広く用いられる溶融亜鉛めっき鋼板を製造する CGL(Continuous Galvanizing Line) のめっき厚を調整するガスワイピングノズル部において、表面品質に大きな影響を与える鋼板の振動や反りを電磁力により非接触で制御する CGL 電磁サポート技術について述べた。鋼板の張力・剛性による復元力と電磁石の吸引力とからなる安定釣合点を見出し、それを利用した電磁石配置の設計方法を確立した。これにより鋼板と電磁石との接触という最大の課題を解決し、安定した鋼板振動・反り抑制を可能にした。更に、PID 制御理論に基づき、鋼板サイズが変化することで振動・反りの状態が急激に変動する溶接点付近 (非定常部) とそれ以外の定常部とで制御ゲインを切り換え、それぞれに求められる性能を満たす新制御方式を提案した。CGL 電磁サポートは JFE スチール全地区で実用化され、振動起因品質欠陥の抑制と振動起因ライン速度制約の解除を達成することで、溶融亜鉛めっき鋼板の生産性向上に大きく貢献している。

第3章では、溶融亜鉛めっき鋼板のめっき厚を調整するガスワイピングノズルに圧電素子を内蔵してスリットギャップを可変にした CGL スマートノズルについて述べた。スマート構造技術をワイピングノズルに適用する世界初の試みにより、従来ノズルと全く同じ外観で可変ギャップを実現した。ノズルリップが開閉する振動モードの固有振動数で圧電素子を駆動し、効率的にノズルを振動させ、掻き落とされた亜鉛がスリットギャップに入り込むノズル詰まりを解消することが最大の狙いである。更に、板幅方向でスリットギャップを適切に変化させることで、板幅変更時に問題となるめっき厚むらを均一化する機能も有している。FEM および実験モード解析を用いて仕様 (500 へ

ルツ以上の高周波振動、静的ギャップ変化 0.1mm 以上) を満たす実機ノズルを設計・製作し、実ラインで性能を立証した。本技術はノズル詰まり発生時のノズル清掃による生産性低下回避だけでなく、歩留改善による生産性向上にも寄与する。

第 4 章では、鉄鉱石や石炭等の原料を搬送するベルトコンベアを対象にした、振動測定に基づく応力推定による鋼構造物劣化診断について述べた。従来把握することが困難であったコンベアフレーム部材にかかる最大応力値を、簡便な振動測定で得られる鉛直 1 次曲げ固有振動数から推定することで劣化診断を行う新手法を提案し、実験および数値解析を通じて有効性を立証した。コンベアフレームの 1 スパンを両端単純支持梁とみなして求めた曲げ応力と固有振動数との関係式が本手法の基礎になっている。これまでに 200 機以上の製鉄所ベルトコンベアについて測定・評価を行い、コンベアフレームの補修・更新の要否判断や優先順位付けに活用する等実用に供している。客観的かつ定量的な評価を実現した本技術は、設備の重大故障防止による安定操業のみならず、補修・更新計画の適正化によるコスト削減、更には製鉄所の安心・安全の確保にも大きく貢献している。

第 5 章では、大型構造物におけるボルト緩みや微小亀裂等、ごく初期段階の損傷検知を目標とする高周波振動利用構造物ヘルスマニタリングについて述べた。米国バージニア工科大学で開発されたピエゾインピーダンス法(構造物に貼り付けた圧電素子の数十キロヘルツ以上の高周波電気インピーダンスを利用する方法)は優れた微小欠陥検知能力を有しているが、検知可能領域が狭いという課題があった。そこで、圧電素子の電気-機械相互作用を利用し、複数の圧電素子間の電気的特性から、2 点間の機械的周波数応答関数に相当する情報を得る伝達電気アドミッタンスという新しい概念を提唱した。損傷検知可能領域を数倍に拡大する効果を実験により立証するとともに、理論的考察を加えた。これにより、従来に比べて大幅に少ない圧電素子での構造物初期損傷検知が可能となり、重要設備・構造物が使用不能に陥るような重大故障や損傷が未然に防止され、製鉄所の安定操業につながる。

第 6 章では、振動データのデジタル信号処理による製鉄所埋設配管の漏水検知について述べた。漏水箇所から伝播する振動の測定による検知は広く行われているが、製鉄所のような振動ノイズが多い環境では適用困難であった。そこで、送水昇圧を利用した漏水信号抽出技術と適応デジタルフィルタを用いたノイズ除去技術を提案した。前者は昇圧により振動レベルに変化を生じた周波数帯域に着目して漏水信号成分を抽出するもので、後者は埋設配管付近の地盤振動がノイズとは相関が高いが、漏水信号とは相関が低いことを利用してノイズを除去するものである。これらの技術と従来法を融合する新しい手法を開発し、製鉄所内埋設配管を使用した模擬漏水検知実験で、毎時 3 立方メートル以下の少量の漏水を誤差 1m 以内の高精度で検知可能なことを示すとともに、実漏水の検知にも成功した。大量の水を使用する製鉄プロセスでの給水トラブルは、生産障害に直結するため、本技術の開発は、製品の安定供給を果たす上でも意義が大きい。

第 7 章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の展望を述べた。本研究で開発した振動制御および振動利用技術は、鉄鋼業における生産性最大化に多大な貢献をするものである。今後はこれらの更なるレベルアップとともに、振動利用の新たな視点として、振動を電力に変換して利用するエネルギーハーベスティング技術等の開発も本研究を契機として進められるであろう。

学位論文審査の要旨

主査	客員教授	石井俊夫
副査	教授	鈴木亮輔
副査	特任教授	井口学

学位論文題名

鉄鋼業における生産性最大化のための振動制御および 振動利用技術に関する研究

(Study on Vibration Control and Application Technology to Maximize
Productivity in Steel Industry)

近年、鉄鋼業では生産性最大化のために、高品質・低コストを満たした上での製品安定供給を実現する技術が強く求められている。製鉄プロセスにおいては、ライン速度を上げて生産すると、製造設備の機械振動が増大して、製品の品質が低下する傾向がある。そのため、通常は高品質確保に必要なライン速度制約を設けており、高生産性を阻害している。製造設備の振動は品質に悪影響を与えるマイナス要因と扱われることが多いが、一方では振動を有効利用してプラス要因にする技術も存在しており、その拡大が期待されている。

本論文は、このような現況にある鉄鋼業において、振動工学の観点から、高品質・低コスト・安定供給そして高生産性を追及する5つの研究テーマについて述べたものである。振動制御および振動利用技術により、振動起因品質欠陥の抑制・ライン速度制約の解除・安定操業の確保・設備稼働率の向上を行い、鉄鋼業における生産性最大化を達成することが本研究の目的である。

(1) 自動車等に広く用いられる溶融亜鉛めっき鋼板を製造する CGL(Continuous Galvanizing Line) のめっき厚を調整するガスワイピングノズル部において、表面品質に大きな影響を与える鋼板の振動や反りを電磁力により非接触で制御する CGL 電磁サポート技術を開発した。鋼板の張力・剛性による復元力と電磁石の吸引力とからなる安定釣合点を利用した電磁石配置の設計方法を確立することで、振動と反り抑制を可能にして操業を安定化した。更に、反りの状態が急激に変動する溶接点付近(非定常部)とそれ以外の定常部とで制御則を切り換えて、各々に求められる性能を満たす新制御方式を提案した。

(2) 溶融亜鉛めっき鋼板のめっき厚を調整するガスワイピングノズルに圧電素子を内蔵してスリットギャップを可変にした CGL スマートノズル技術を提案した。スマート構造技術をワイピングノズルに適用する世界初の試みにより、従来ノズルと全く同じ外観で可変ギャップを実現した。ノズルリップが開閉する振動モードの固有振動数で圧電素子を駆動して、効率的にノズルを振動させることで、掻き落とされた亜鉛がスリットギャップに入り込むノズル詰まりを解消させた。更に、板幅方向でスリットギャップを適切に変化させる

ことで、板幅変更時に問題となるめっき厚むらを均一化する機能も付与できた。

(3) 鉄鉱石や石炭等の原料を搬送するベルトコンベアを対象にした、振動測定に基づく応力推定による鋼構造物劣化診断技術を確立した。コンベアフレームの1スパンを両端単純支持梁とみなして求めた曲げ応力と固有振動数との関係式をベースに、従来把握することが困難であったコンベアフレーム部材にかかる最大応力値を、簡便な振動測定で得られる鉛直1次曲げ固有振動数から推定することで腐食減肉に伴う老朽劣化を診断する新手法を提案した。推定した最大応力と許容応力とを比較することで、客観的かつ定量的な評価を可能にした。

(4) 大型構造物におけるボルト緩みや微小亀裂等、ごく初期段階の損傷検知を目標とする高周波振動利用構造物ヘルスマニタリング技術を提案した。米国バージニア工科大学で開発された構造物に貼り付けた圧電素子の高周波電気インピーダンスを利用する方法は優れた微小損傷検知能力を有しているが、検知可能領域が狭いという課題があった。そこで、圧電素子の電気-機械相互作用を利用して、複数の圧電素子間の電気的特性から、2点間の機械的周波数応答関数に相当する情報を得る伝達電気アドミタンスという新しい概念を提唱して、損傷検知可能領域を4倍以上に拡大する効果を確認した。

(5) 振動データのデジタル信号処理による製鉄所埋設配管の漏水検知技術を確立した。漏水箇所から伝播する振動の測定による検知は広く行われているが、製鉄所のような振動ノイズが多い環境では適用困難であった。そこで、送水昇圧を利用した漏水信号抽出技術と適応デジタルフィルタを用いたノイズ除去技術を提案した。前者は昇圧により振動レベルに変化を生じた周波数帯域に着目して漏水信号成分を抽出するもので、後者は埋設配管付近の地盤振動がノイズとは相関が高いが、漏水信号とは相関が低いことを利用してノイズを除去するものである。これらの技術と従来法を融合する新しい手法を開発した。

本研究では、以上5つ全ての研究テーマについて、学術的見地から検討の上、実機サイズの実証試験で有用性を立証した。既に一部は実用化しており、生産性向上に大きく貢献している。

これを要するに、著者は、鉄鋼業における振動制御および振動利用技術に関して、生産性最大化につながる多くの知見とその応用について述べており、鉄鋼ばかりでなく材料プロセス工学における新たな科学技術の提供に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。