

## 博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏 名 木下 貴博  
 学 位 博士 (工学)  
 学 位 記 番 号 新大院博 (工) 第 527 号  
 学位授与の日付 令和 4 年 3 月 23 日  
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当  
 博 士 論 文 名 鉄鋼業におけるマイクロ波利用技術に関する研究

論 文 審 査 委 員 主査 教授・山田 寛喜  
 副査 教授・佐々木 重信  
 副査 教授・大河 正志  
 副査 教授・中野 敬介

## 博士論文の要旨

鉄鋼業は、自動車・造船・建築等の産業に欠かすことのできない鋼材を製造する基幹産業である。鉄鋼製造プロセスは巨大な生産設備を用いたプラントであり、高温の熔融物や粉体を大量に取り扱い、かつ 24 時間昼夜を問わず稼働を続ける等、他の産業にはない特徴を有している。また、日本の製鉄設備の多くは高度経済成長期に建設され、稼働から 40 年以上が経過したものが多く、このような設備を使用しつつ製品の品質や生産の安定性を担保するためには、設備の劣化の予兆を把握することが必要であり、そのためには 24 時間、周囲の環境に依らず設備の状態を監視する新たなセンサ技術の開発が不可欠である。

本論文では、電波、特にマイクロ波を用いた計測技術に着目した。電波を用いたセンシング、特にレーダは、電磁波による非接触・非破壊計測であることに加え、可視光や赤外光に比べて波長が長いため、粉塵や雨滴等の粒子で散乱されにくく、人間の視力の及ばない遠方まで測定が可能であるという特長を有している。また、マイクロ波帯における空気の屈折率の温度変化は小さく、周囲の温度変動の影響を受けにくいという特長を有しており、鉄鋼製造プロセスの計測に適している手段のひとつといえ、高炉や転炉等の高温プロセスにおける内部物体の位置計測等に実用されている。さらに、屋外に設置された大型の設備の変位や振動の状態を周囲の明るさや天候に左右されずに監視する手段としても、レーダは有用であると考えられる。しかしながら、製鉄所の構内は大型の重機やクレーンが数多く稼働しており、これらの影響でレーダ自身が振動外乱を受けるという課題がある。そこで本研究では、このような外乱の存在下でも測定対象のみの変位や振動状態を抽出する手法を提案し、鉄鋼製造プロセスにおける新たなマイクロ波計測手法を確立することを目的とし、製鉄設備の経年変化による劣化の検出を目的とした監視設備の振動検出手法、特に複数のレーダを用いた外乱に対してロバストな計測手法を提案し、その有効性を実証している。具体的な成果は以下のとおりである。

(1) 2 つの CW ドップラレーダを用いたターゲットの振動の振幅と振動数を推定する方法を考案した、これは各々のレーダ信号のクロススペクトルを用いて外乱を抑圧するという独創的なものである。具体的には外乱は各プラットフォームで無相関 (異なる周波数)

を有し、ターゲット応答には相関（同じ周波数）があることに着目している。ここでは、さらにレーダ周波数との関係に関する理論解析を行い、最適なレーダ周波数との関係を明らかにしている。またクロススペクトルにおける基本波、高調波の振幅比により監視設備の振動振幅の推定も可能となることを示した。これらに関してシミュレーションと実験を行い、提案手法が正しく動作することを実証した。

(2) クラメール・ラオの下界を用いて、提案手法より達成可能なターゲットの振動数と振幅の推定精度の理論解析および定量評価を行い、シミュレーションとの比較によりこれらの妥当性を確認した。この解析により、提案手法は通常のインフラおよびプラント設備の振動監視に対して、ミリ波帯のレーダが最適かつ十分な精度を有していることを示した。

(3) 実利用環境では監視設備以外にも様々な位置に什器が存在し、それらが異なる振動を有するクラッタとして混入することが予想される。それを回避するための方策として **FMCW** 方式のレーダの導入を提案した。これは不要応答の除去のみならず、各々の距離に存在する所望ターゲット（監視設備）を分離するため、複数設備の監視も可能とするため、実用上のロバスト性も高い。その有効性をシミュレーションと実験で原理検証した。

#### 審査結果の要旨

本論文において示された工場プラントや社会インフラの振動解析を行うレーダ方式は、観測時に問題となるレーダ設置場所の環境による擾乱・振動を、複数のレーダのクロススペクトルを用いて抑圧するというユニークなアプローチにより解決した研究である。このような振動監視レーダシステムの検討は、ほかには見られず新規性、独創性の高いものである。さらにミリ波 **FMCW** レーダでの実装は、近年急速に低価格化が進み、また免許不要（技術適合証明のみ）で利用可能となるため、実用的な観点からも高い有効性が認められる。この検討は振動観測までにとどまっているが、長期の観測による変動の監視により、異常検出を容易にすることは言うまでもない。近年の機械学習等による時系列データの異常検出手法への応用という展望も示されており、得られた成果の将来の発展性も極めて高い。

これらの成果は1編の参考論文（筆頭著者）として論文誌に掲載されており、また関連論文として2編の査読付き国際会議発表論文（全て筆頭著者）がある。これらにより専攻の基準を満たしている。

以上のように、本研究には、独創性、新規性、有効性が認められ、内容として博士論文に値するものである。よって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。