

【研究論文】

【平成29年度～令和元年度 受託研究】

鉄道レールの溶接余盛(よもり)除去装置の開発 —第二報 粗加工機と仕上げ加工機の開発—

家口 心, 今野 啓輝^{*1}, 小松 良知^{*1}, 吉川 穰, 渡邊 洋一, 久田 哲弥^{*2}
自動車産業支援部, ^{*1}大研工業株式会社
(^{*2}現 新産業振興課)

レール削正時の負荷を軽減する溶接余盛除去装置の実現を目指し、「粗加工機」と「仕上げ加工機」の開発を行った。まずフライスカッターを用いてレール断面のほぼ全周を削正可能な粗加工機を開発した。ただし装置の重量と操作性に課題を残した。次にレール頭頂面と頭側面に特化した仕上げ加工機を開発した。仕上げ加工機は自動スライド機構を装備したことで、非熟練者でも少ない操作で精度の高い加工が可能となる装置となり、特許出願を行った。またレールの仕上げ面における残留応力は概ね400MPa以下であり、深さ方向における特徴的な変化傾向は認められず、回折X線の半価幅は表層程大きくなる傾向が見られた。最後に、開発装置が作業環境の寒暖差や降水等に対応する耐候性を有することを確認した。

キーワード: 鉄道レール, 削正, 研削, 切削, 粗加工機, 仕上げ加工機

1 緒言

新幹線や都市部の在来線では、騒音・振動の低減および列車の乗り心地向上の観点から、レールの継ぎ目を溶接により排除したロングレール軌道が採用されている^{1), 2)}。レールの溶接工程には、溶接部の余盛を除去し段差を平滑化する削正作業が付随する。現在この削正作業はハンドグラインダを用いて人力で行われており、作業の高効率化や負担軽減が課題となっている³⁾。本研究では、上記課題の解決を目指した余盛除去装置の開発を行った。

現場で使用される余盛除去装置には粗加工から仕上げ加工までの幅広い削正機能だけでなく、可搬性や耐候性、安全性などの性能も要求される。このように必要となる機能が多岐にわたるため、それらを1台で網羅する設計は現実的でないと判断した。そこで、大部分の余盛を効率的に除去する粗加工機と、列車の車輪と接触する頭頂面と頭側面のみを選択的に仕上げる仕上げ加工機の2台に分離して開発を行うこととした。

前報⁴⁾においては、レール削正に適した工具や加工条件の選定手法について述べた。本稿では、前報で紹介した手法により選定された工具や加工条件を生かし、レール全周の余盛を効率的に除去すべく開発された粗加工機と、車輪との接触面の精密仕上げを担当する仕上げ加工機の仕様、及び、各装置を用いたレール削正の模擬試験について述べる。

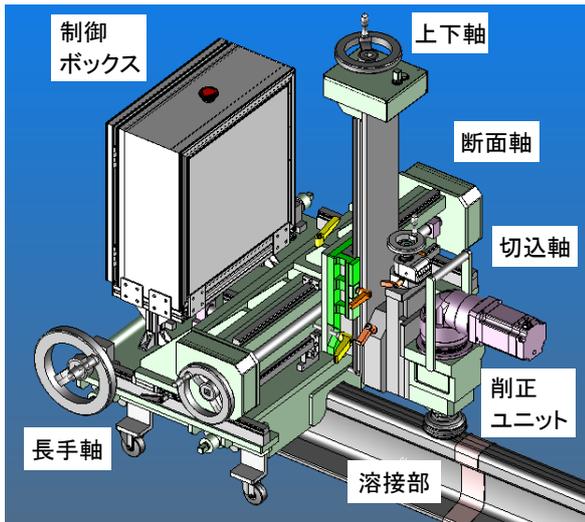


図1 軽便トロ

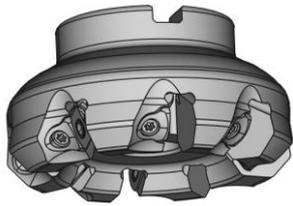
2 開発コンセプト

図1に「軽便トロ⁵⁾」と呼ばれるレール上を移動する手押し式の台車を示す。レールの溶接作業に使用する各種機材は、軽便トロに積載し運搬される。また、軽便トロのレールへの脱着作業は2名以下で実施しなければならず、開発する装置は軽量(できれば50kg/ユニット以下)である必要がある。このため全自動化は難しく、手動作業をある程度残しながらも作業負担を大幅に軽減できる装置の開発が求められる。

レール溶接時の余盛は溶接後の「押抜き(Trimming)」と呼ばれる工程により、平均厚さ約3mmの余盛を残してせん断加工される。削正作業は押抜き後にレール全周



装置本体



削正工具
(正面8枚刃)

図2 開発した粗加工機の3次元形状

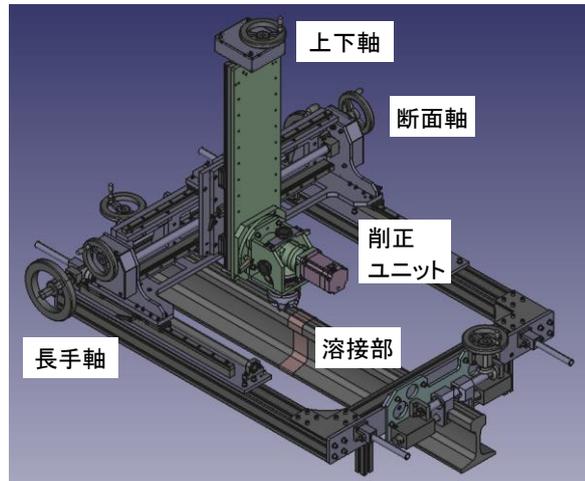
型化が困難であると判断したため、レール全周の残余盛を概ね除去する粗加工機と、列車の車輪が接触するレールの頭頂面と頭側面のみを精密に仕上げる仕上げ加工機に分けて開発することとした。

3 粗加工機の開発

図2に開発した粗加工機の3次元形状を示す。本装置はレールの長手方向、断面方向、上下方向の3軸方向に直動するガイドフレームと首振り式の削正ユニット、およびダイヤル式の切込軸から構成され、レールの長手方向において溶接箇所からオフセットした位置に片持ち状態で固定して使用される。削正工具にはフライスカッターを用いた。各直動ガイドフレームはダイヤルによる手動式であり、削正ユニットの回転も手動で行う。削正ユニットはレール各部の正面加工が可能となる角度において位置決めピンにより固定される。

図3に粗加工機的设计の初期段階における3次元形状を示す。本図に示すとおり、当初はレール長手方向において溶接箇所を中心に据え、それを跨ぐようにフレームを固定する構造を採用していたが、軽量化と加工部位の視認性確保の観点から、現状の構造へ変更した。

図3に示す粗加工機の初期的设计段階においては、削正にフライスカッターの側面も使用可能なフライスカッターを選定したが、側面での削正時において装置全体の振動が増幅する傾向が見られたため、カッターの正面でのみ削正する仕様に変更した。本工具は前報⁴⁾で述べた工具や加工条件の最適化手法を用いて、追加実験を含む複数の結果を比較検討し最適化したフライスカッターを選定した。



装置本体



削正工具
(側面使用可)

図3 初期設計における粗加工機の3次元形状

4 仕上げ加工機の開発

図4に開発した仕上げ加工機の3次元形状を示す。本装置は、レール長手方向において丸棒の直動ガイドに倣いながら削正ユニット(ディスクグラインダ)を自動的に往復スライドさせる機構と、レール断面方向に手動で移動させ頭頂面から頭側面までの任意の位置で固定可能な円弧型のガイド機構、および削正ユニットのダイヤル式の切込軸から構成される。レールの長手方向において、溶接部を中心に据え、それを跨ぐようにフレームを固定する両端支持構造を採用した。

往復スライド機構の全ストロークは600mmであるが、仕上げの段階に応じて200/400/600mmに変更可能とすることにより、エアカット時間の短縮を図った。削正ユニット

に残留する余盛を機械的に除去する工程である。当初、押抜き後から列車が通過可能となる最終仕上げまでを1台で網羅する装置の開発を目指していたが、装置の小

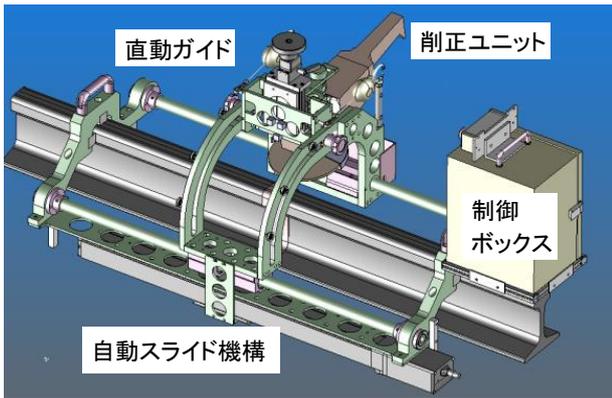


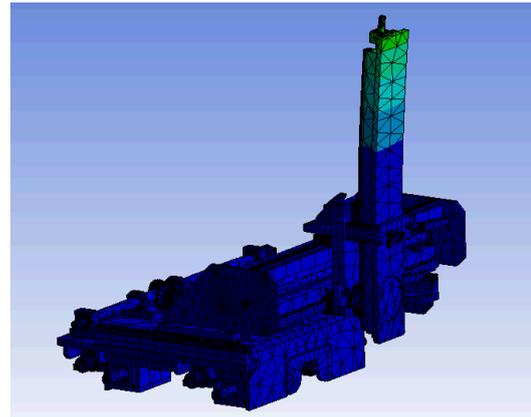
図4 開発した仕上げ加工機の3次元形状

にはプーリーを介してカウンタバランスを接続し、断面方向の移動時において、削正ユニットへ常時吊上げ荷重が作用する機構を採用することによって、重力による移動負荷を相殺する仕様とした。工具としては、設計の初期段階では粗粒(#30)のCBN電着砥石を使用したのが、レールと台金の摩擦時に発生する耳障りな高周波音や、砥石の自生発刃作用が皆無であり目詰まりが発生し易いことなどから、一般砥石へ変更した。

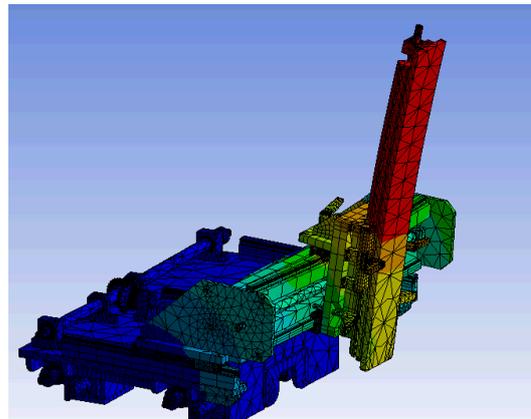
なお、仕上げ加工機的设计案については特許出願済⁶⁾である。

5 フレームの構造解析

粗加工機、仕上げ加工機共に、設計の途中段階において、構造上の信頼性を確認するため、コンピュータシミュレーションによるフレームの構造解析を行った。解析には市販の構造解析ソフトであるANSYS社のMechanicalを用いた。当初は工具に一定の荷重を负荷した場合の応力と変形量を求める静解析のみの実施を計画していたが、切削により余盛の除去を行う粗加工機に関しては、工具とレールが断続的な接触状態となるため、フレームの振動が問題となることが判明した。そこで、粗加工機に関しては、静解析に加えて、モーダル解析による共振周波数と共振時における変形形態の確認、および、振動現象も考慮した変形量を求めることができる周波数応答解析を行った。一例として、粗加工機の周波数応答解析の事例を図5に示す。フレームの補強後(下)であっても共振周波数に近い条件(刃数×回転数)で加工が行われた場合には、補強前よりも変形が大きくなる。一連の構造解析は、構造上の信頼性の確認と共に、効果的な補強策の検討等に活用された。



補強前(最大変位: 6.4 μm、117 Hz)



補強後(最大変位: 26.7 μm、53 Hz)

図5 粗加工機2次試作機の周波数応答解析例

6 レール削正の模擬試験

6.1 粗加工機による模擬試験

図6に開発した粗加工機を用い、レール削正試験を行っている様子を示す。本図から粗加工機を用いることにより、レール断面の各位置においてフライスカッターによる正面加工が可能であることが分かる。

模擬試験を行ったところ、研削砥石と比較してフライスカッターは除去能力が高いものの、工具の位置決めに多くの時間が費やされることがわかった。また、総重量も約160kgと重く、2名での移動は不可能であった。以上のことから、作業時間に要する非加工時間の短縮や軽量化など、粗加工機の実用化には多くの課題が残されていることが分かった。

6.2 仕上げ加工機による模擬試験

開発した仕上げ加工機を用いて、レールの仕上げ作業を行っている様子を図7に示す。自動スライド機構を



頭頂面の削正



頭頂面の削正



頭頂面角部の削正



頭側面の削正

図7 仕上げ加工機によるレール削正試験の様子

実際のレール溶接作業者にも体験して頂いたところ、仕上がりの精度に問題はなく、経験の浅い作業者でも熟練作業者と比較して遜色のない仕上げ精度が期待できるとの評価をいただいた。装置重量は約70kgであり、目標とする50kg以下は達成できなかったものの、2名で搬送可能な装置を実現することができた。



腹部の削正

7 仕上げ面における残留応力

金属材料表面に残留する過度な引張応力は、表層の亀裂を誘発する危険性があるため、列車の通過に伴う繰返し荷重が付与される鉄道レールにとって極力抑制すべきである^{7), 8)}。そこでレールの仕上げ面を段階的に電解研磨しながら、ポータブル型X線残留応力測定装置(X- μ 360s, パルステック工業)を用いて残留応力の測定を行った。残留応力測定時、硬度と比例的な関係があるとされる回折X線の半価幅も同時に出力される。得られた結果から研削面における残留応力と半価幅の深さ方向の分布を評価した。

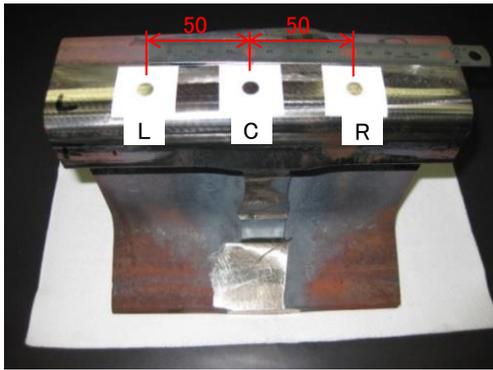
図8にレールの残留応力測定箇所と残留応力を測定している様子を示す。残留応力の測定箇所はレール頭頂面の溶接部中心とそこから長手方向の両側に約50mmずつ移動した2点の計3箇所の位置とした。各位置



底部傾斜面の削正

図6 粗加工機によるレール削正試験の様子

装備したため、レール断面方向における削正ユニットの移動と微小切込軸のみを手動で操作することにより、レールの削正作業を進めることができる。



残留応力の測定箇所



残留応力の測定

図8 レール仕上げ面における残留応力測定の様子

においてφ8mmの開口窓を持つマスクシールを貼付し、最表面、および最表面から約50μm電解研磨が進行する毎に残留応力の測定を行った。

図9に各測定点における残留応力の測定結果(レールの長手方向と断面方向)を示す。先行調査から、ハンドグラインダのみを用いて削正を行う従来の工法で仕上げられた面(最表面)の残留応力は概ね400MPa以下であることを確認済である。今回開発した余盛除去装置を用いて仕上げた面については、一部400MPaを超過する結果が見られたものの、概ね400MPa以下であることを確認することができた。レールの長手方向と比較して断面方向の残留応力が小さい傾向が見られたが、この原因として削正工具(ディスク砥石)の回転方向の影響や、削正時に積載されていた装置の重量が解放されたことに由来する影響等が考えられ、解明にはより詳細な調査が必要である。なお、深さ方向において特徴的な変化傾向は確認されなかった。

図10に回折X線の半価幅の測定結果を示す。半価幅は表層程大きくなる傾向があることが分かった。このことは、レール内部の靱性を損なうことなく表層の硬度が高められていることを示しており、レールの耐摩耗性を高める観点からは都合の良い結果が得られていることを確認した。

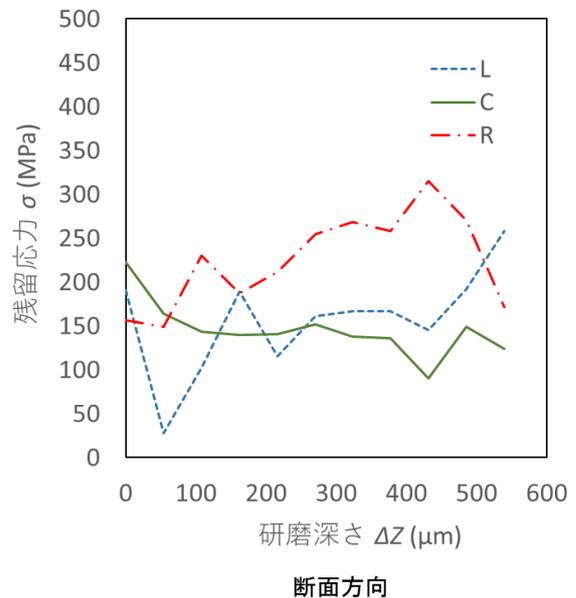
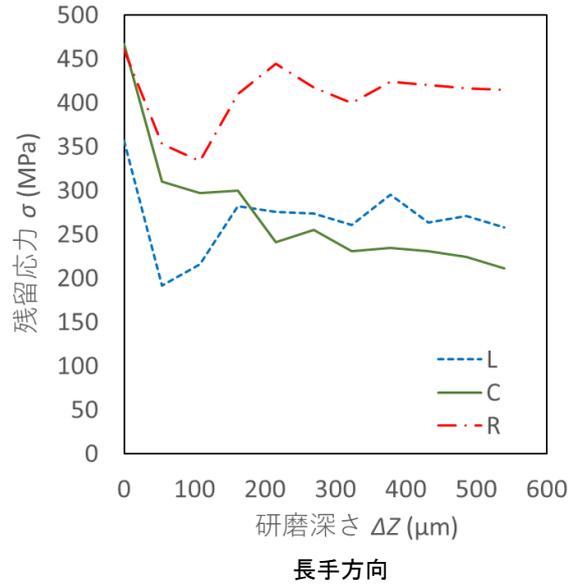


図9 レール仕上げ面における残留応力

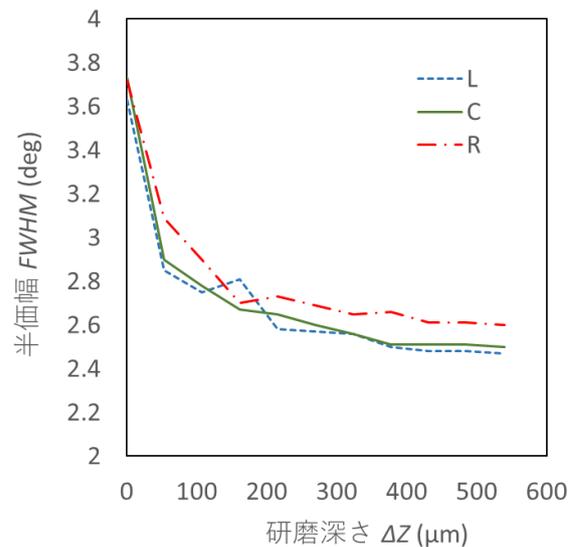


図10 レール仕上げ面における半価幅



図11 恒温槽による温度サイクル試験の様子



図12 電気部品の散水試験の様子

8 耐候性試験

開発した余盛除去装置は屋外で使用されるため、外気温の変化や降雨による影響を少なからず受ける。そこで、これらの影響を受けやすい電気部品（モータ、自動スライド機構、配電ボックス等）について熱サイクル試験（ $-15\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、3サイクル）と散水試験（10L/min、1min、2サイクル）を行った。

図11に恒温槽（PSL-4KPH、タバイエスペック）内に電気部品を配置し温度サイクル試験を実施している様子を示す。各部品の表面において、低温時には着霜、高温時には水滴の付着といった変化が確認されたが、本温度サイクル試験後、装置の不具合は確認されなかった。

また、図12に電気部品へ上方から散水を行っている様子を示す。水の侵入をある程度防止する制御ボックスを含め、各部品には防水性のあるものを選定したため、本散水試験による装置への影響は確認されなかった。

9 結言

レール削正時の負荷を軽減する溶接余盛除去装置の実現を目指し、「粗加工機」と「仕上げ加工機」の開発

を行った。その結果、以下に記す成果が得られた。

- (1) 装置の軽量化と操作の単純化に課題を残すものの、フライスカッターを用いてレール断面のほぼ全周を削正可能な粗加工機の開発に成功した。
- (2) レール頭頂面と頭側面の精密仕上げを可能とする仕上げ加工機の開発に成功した。本装置は自動スライド機構を装備し、非熟練者でも少ない作業負荷で高精度な仕上げを実現できる可能性を有する。
- (3) レールの仕上げ面における残留応力は概ね400MPa以下であり、深さ方向における特徴的な変化傾向は認められない。回折X線の半価幅は表層に近い程大きくなる傾向がある。
- (4) 開発装置は、作業環境の寒暖差や降水等に対応する耐候性を有する。

謝辞

本研究は令和元年度中小企業経営支援等対策費補助金（戦略的基盤技術高度化支援事業）「鉄道レールの溶接余盛除去装置の開発」の一環で実施されたものである。

参考文献

- 1) 山本隆一. レールの溶接. 日本溶接学会誌. 2012, 81(8), p. 641-649.
- 2) 才田健二ほか. レールの溶接技術の動向と今後の展開. 新日鉄住金技報. 2013, 395, p. 85-94.
- 3) 齋藤優輝ほか. レール溶接仕上用機械の開発. JR EAST Technical Review. 2012, 39, p. 67-70.
- 4) 家口心ほか. 鉄道レールの余盛(よもり)除去装置の開発 - 第一報 レールの削正用工具と削正条件の実験的検討 -. 宮城県産業技術総合センター研究報告, 2019, 16, p. 1-4.
- 5) 鈴木紀彦ほか. 鉄道レールの全断面削正装置の開発 - 第1報:アーム型手動削正装置の開発 -. 2016年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集. 2015, p. 169-174.
- 6) 特願 2020-024898, 「レール研削装置」.
- 7) 名村明ほか. レールの亀裂進展を予測する. Railway Research Review. 2015, 72, p. 20-23.
- 8) S. TAKAHASHI, et al. RESIDUAL STRESS EVALUATION OF RAILWAY RAILS, JCPDS-ICDD, 2009, p. 240-247.