

# 論文 レール鋼への熱処理条件が 脱炭層形成に与える影響の検討

西村 英典<sup>1</sup>・木村 成克<sup>2</sup>・兼松 義一<sup>1</sup>・辻江 正裕<sup>2</sup>・松井 元英<sup>1</sup>

<sup>1</sup>非会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部摩擦材料

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:nishimura.hidenori.01@rtri.or.jp, kanematsu.yoshikazu.23@rtri.or.jp, matsui.motohide.69@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部軌道力学

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:kimura.shigekatsu.96@rtri.or.jp, tsujie.masahiro.13@rtri.or.jp

レール表層に形成された脱炭層はレール母材のパーライト組織よりも炭素濃度が低下しているため、材料強度は母材よりも低い。この脱炭層がレール-車輪間の転がり接触疲労を起因としたレール損傷の発生に影響を与えている可能性が考えられるが、これまでに十分に検討されていない。さらに室内試験機を用いて脱炭層の形成程度が転がり接触疲労に与える影響を評価するためには、レール鋼に脱炭層を付与するための熱処理手法を構築する必要がある。そこで、レール鋼から採取した試験片表層に脱炭層を付与するための熱処理条件を検討した。その結果、1,000°Cに加熱した炉にレール鋼を入れ、保持時間を変えて炉冷することで、程度の異なる脱炭層を再現できることがわかった。

**Key Words :** rail steel, decarburized layer, heat treatment condition

## 1. はじめに

レール製造工程において、熱間圧延のために加熱されたレール鋼中の炭素と雰囲気中の酸素が結合し、レール表面から脱炭を起こすことがある。一般的に鋼材表面に脱炭層が形成される場合、母材よりも炭素濃度が低下するため、材料強度は鋼材表面で低下し、疲労強度が低下する傾向にある<sup>1)2)</sup>。レールにおける脱炭層を考えた場合、車輪との繰り返し転がり接触によって早期に摩耗することが考えられる。一方で、累積通過トン数が5,000万トン以下の少ない通過トン数でもレール損傷が発生すると報告されており<sup>3)</sup>、敷設後間もない時点で発生するレール損傷の発生に脱炭層が影響を与えている可能性がある。そこで、著者らは、脱炭層がレール損傷につながるき裂発生に与える影響を確認することを目的として二円筒転がり接触試験機を用い、脱炭層を付与したレール鋼試験輪による接触回転試験を検討している。

この試験を行うためには脱炭層を付与したレール鋼試験輪を製作する必要があるため、試験輪表層に脱炭層を付与するための熱処理方法を構築する必要がある。そこ

で、本論文ではレール鋼に脱炭層を付与する熱処理条件について検討した。次に、熱処理試験後のレール鋼の金属組織観察および硬さ試験により脱炭層の有無や形成状態を把握した。さらに、熱処理試験で付与した脱炭層が実レールに形成された脱炭層の状態の再現について考察した。

## 2. 熱処理条件の検討

レール鋼に相当する炭素量0.6%~0.8%程度の高炭素鋼に脱炭を生じさせるには約730°C以上の高温に加熱し、その温度で保持することが必要で、保持時間の増加に伴い脱炭が進行することが知られている<sup>1)2)</sup>。しかし、脱炭層付与のために加熱条件、および冷却条件によっては金属組織がレール母材から変化する可能性がある。そうした場合、二円筒試験を用いたレール鋼表層の脱炭層と転がり疲労起因のき裂の発生との関係を把握する試験は、実レールの金属組織とは異なるため、評価が困難になる。そのため、レール鋼を熱処理した後の金属組織もレール

母材と同じパーライト組織としなければならない。パーライト組織を得るためには、レール鋼を高温保持し、金属組織をオーステナイト組織に変態させた後、マルテンサイト組織が生成されない程度の冷却速度で冷却する必要がある<sup>4)</sup>。

今回、室内試験でレール鋼をオーステナイト組織に変態させる温度以上に加熱し、その温度での保持時間の変化による脱炭層の形成程度を効率的に評価するため、レール鋼の加熱温度は1,000°Cとした。また加熱温度1,000°Cで保持すれば、レール鋼から脱炭が生じると期待される。

次に今回の熱処理試験の保持時間を最大で60分とし、保持時間が脱炭層形成に与える影響を検討するために保持時間15分、30分、45分の試験も併せて実施した。

また共析鋼の連続冷却変態曲線より、パーライト組織が生成するためには冷却速度は15.6°C/sec以下である必要がある<sup>4)</sup>ことを参考にして、加熱後のレール鋼の冷却速度を15.6°C/sec以下とした。

### 3. レール鋼試験片の熱処理試験

#### (1) 熱処理装置

熱処理条件の検討に、高温ケラマックス炉SS-2030KP（株式会社東京本山商会製）を使用した。この炉は最大で1,200°Cまで加熱でき、プログラムによる炉内温度制御が可能である。また炉内温度1,000°Cに保持した状態で炉の電源を切って冷却（炉冷）すると、図-1に示すように時間とともに炉内温度が低下することを確認した。計測した温度の最大冷却速度は10.5°C/sec（1000°Cから874°C、経過時間12分）であったことから、この熱処理装置の炉冷による冷却で、熱処理試験後のレール鋼の金属組織をパーライト組織に戻すことができると考えられる。

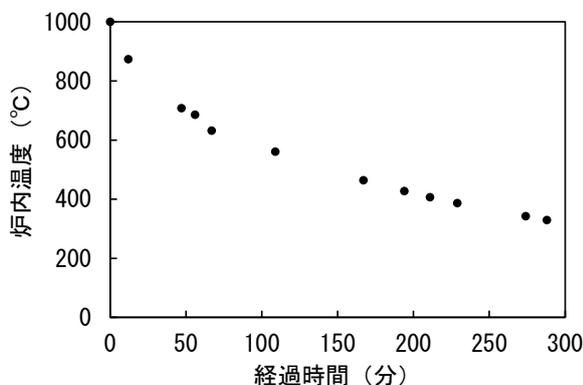


図-1 1,000°Cからの炉冷温度推移

#### (2) レール鋼試験片の採取方法・寸法

レール鋼試験片は図-2に示すように普通レールの頭部から、10 mm×5 mm×1 mmの寸法で採取した。採取したレール鋼試験片の寸法および外観写真を図-3に示す。

#### (3) 試験条件

今回は図-4に示すようなヒートパターンで熱処理試験

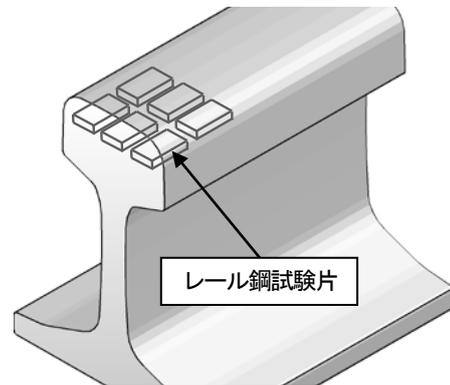
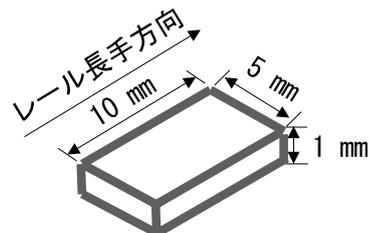
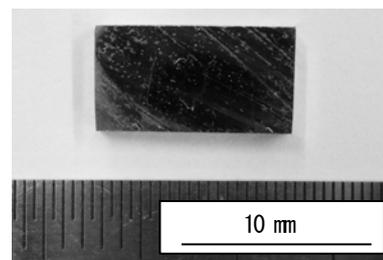


図-2 レール鋼試験片採取の模式図



(a)レール鋼試験片の寸法



(b)レール鋼試験片の外観写真

図-3 レール鋼試験片の寸法・外観写真

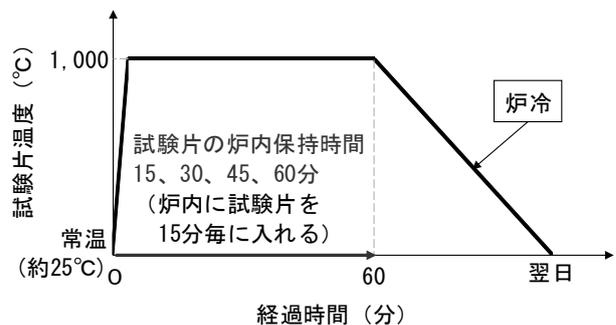
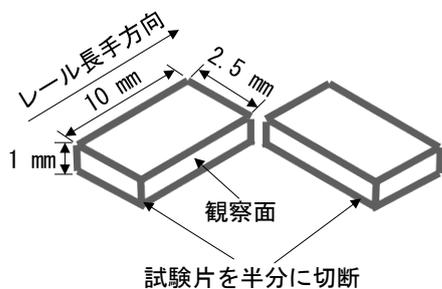


図-4 熱処理試験の模式図

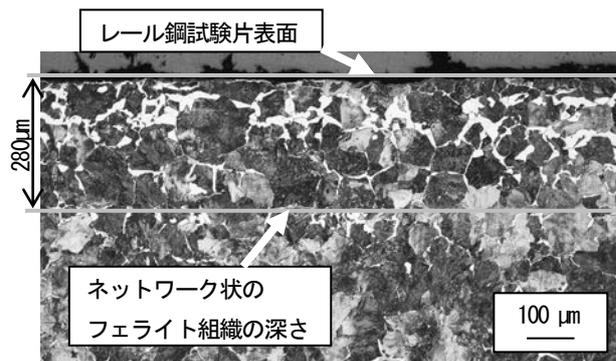
を実施した。この試験では、1,000°Cまで加熱した炉にレール鋼試験片を入れ、炉内に15分、30分、45分、60分保持し、その後レール鋼試験片を炉に入れたまま電気炉の電源を切ることによって炉冷させた。レール鋼試験片の10 mm×5 mmの面が炉の均熱帯の中で上を向くように置き、脱炭層観察にはこの面からの脱炭を評価した。その後、**図-5**に示すようにレール長手方向に平行で試験片の中心を通る断面を研磨した後に5%ナイトール液で腐食させ、レール鋼試験片表面層の金属組織観察を行った。また金属組織観察面において試験片表面から深さ方向に硬さ試験を実施した。試験はマイクロビッカース硬度計MVK-G1（株式会社明石製作所製）により、測定荷重は0.98 N、測定間隔は試験片表面から50μmの深さを基準として、深さ500μmまで50μmおきに硬さを測定した。

#### (4) 試験結果

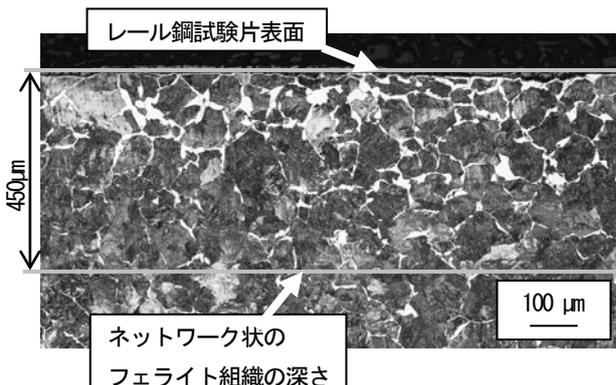
**図-6**に、熱処理試験後のレール鋼試験片表面層の金属組織観察結果（観察倍率100倍）をそれぞれ示す。炉内保持時間が最も短い15分において試験片表面からネットワーク状のフェライト組織が観察された。さらに炉内保持時間が延びるに伴いネットワーク状のフェライト組織がレール鋼試験片のより深部で観察された。また**図-6(d)**に示す炉内保持時間60分のレール鋼試験片表面において、横方向（レール長手方向）に帯状に脱炭している様子が観察された。また**図-7**に各レール鋼試験片の500μm深さ



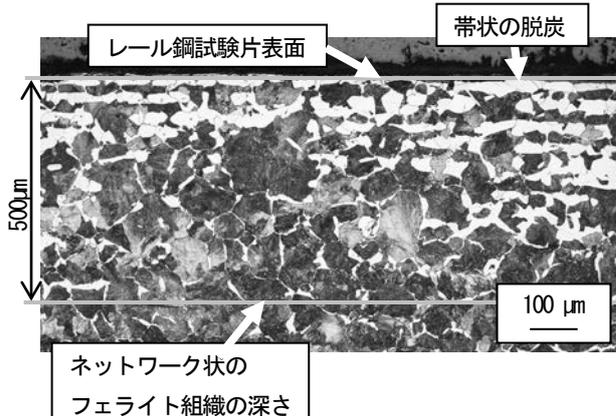
**図-5** レール鋼試験片の金属組織観察面の模式図



(b) 炉内保持時間 30分

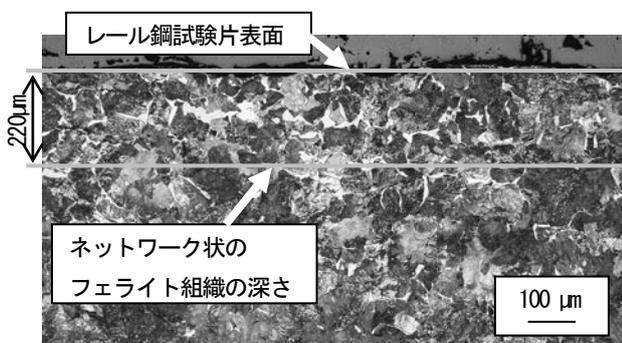


(c) 炉内保持時間 45分



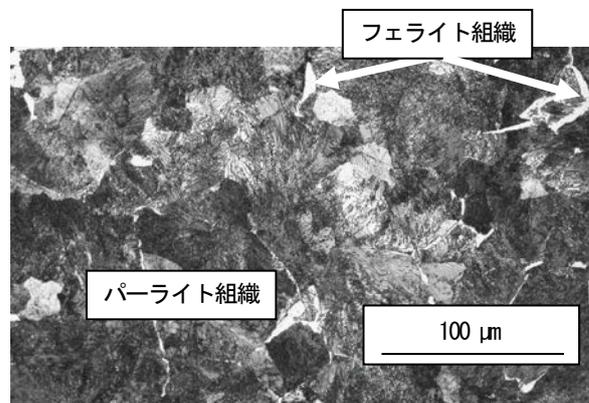
(d) 炉内保持時間 60分

**図-6** 熱処理試験後の金属組織写真（続き）



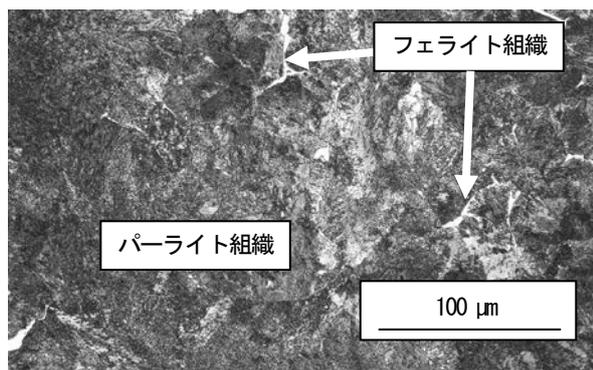
(a) 炉内保持時間 15分

**図-6** 熱処理試験後の金属組織写真

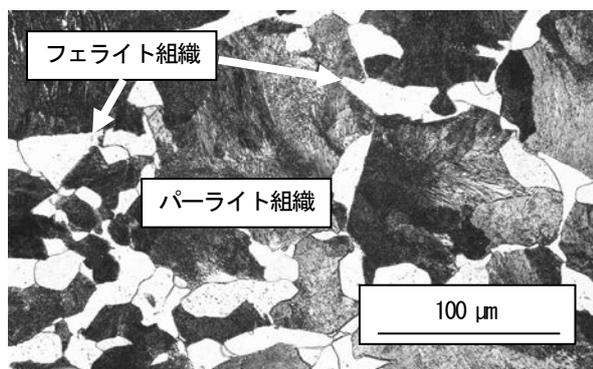


(a) 炉内保持時間 15分

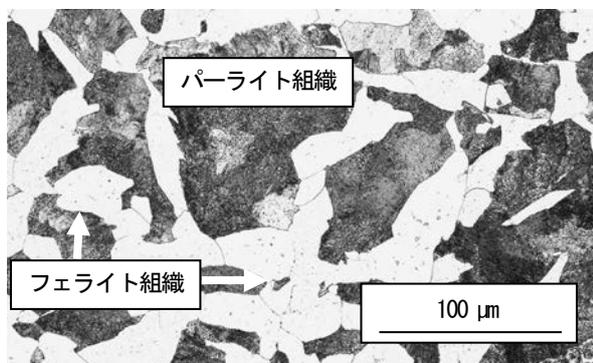
**図-7** 熱処理試験後の金属組織拡大写真



(b) 炉内保持時間 30分



(c) 炉内保持時間 45分



(d) 炉内保持時間 60分

図-7 熱処理試験後の金属組織拡大写真 (続き)

での金属組織拡大写真 (観察倍率400倍) を示す。すべてのレール鋼試験片で白いフェライト組織と灰色のパーライト組織を有する金属組織が得られた。

次に、熱処理試験後の各試験片について、試験片表面から深さ方向に硬さ試験を行った結果を図-8に示す。参考として、熱処理を実施していない試験片の硬さも示す。各試験片の表面から300μmまでの深さの硬さは、いずれも熱処理を行っていない試験片の硬さよりも低くなっていた。試験片表面から50μm深さでの硬さは、炉内保持時間15分および30分で約200HV、炉内保持時間45分お

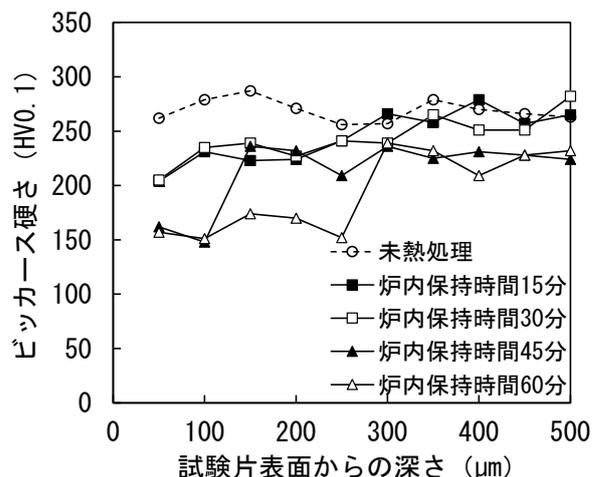


図-8 炉内保持時間ごとの試験片表面から深さ方向の硬さ分布

および60分で約160HVであり、炉内保持時間の増加に伴い試験片表面が軟化していた。また深さ方向の硬さの変化に注目すると、炉内保持時間の増加に伴い試験片内部まで軟化しており、炉内保持時間60分の試験片が最も深くまで硬さが低くなっていた (250μm深さまで150~160HV)。

#### 4. 考察

##### (1) レール鋼表面に脱炭層を付与する熱処理条件

熱処理試験後の脱炭層の有無について、ISO5003” Flat bottom(Vignole) railway rails 43 kg/m and above”の規定から検討する<sup>9)</sup>。この規定によると、ネットワーク状のフェライト組織を脱炭層と定義している。このことから熱処理試験後のレール鋼試験片表面には脱炭層が存在している。さらに熱処理後のレール鋼試験片がパーライト組織となっていたことから、レール母材のパーライト組織と同様の金属組織で、表面に脱炭層を付与することができたとと言える。熱処理試験結果から、レール鋼表面に脱炭層を付与するためには1,000°Cに加熱した炉にレール鋼を入れ、15分以上保持した後に炉冷の熱処理条件が妥当と考えられる。

##### (2) 炉内保持時間に伴う脱炭層深さの変化

3章4節の図-6の金属組織写真から、ISO5003に規定される手法を用いて炉内保持時間ごとの脱炭層深さを測定した。これは脱炭によって生じたネットワーク状のフェライト組織を目視観察し、ネットワークの最深点までを脱炭層深さとする測定法である<sup>9)</sup>。ISO5003に規定される手法で測定されたネットワーク状のフェライト組織の深さは、保持時間15分から順に、220μm、280μm、450μm、500μmであった。

測定されたネットワーク状のフェライト組織の深さを脱炭層深さとし、炉内保持時間に伴う脱炭層深さの変化を図-9に示す。

炉内保持時間の増加に伴い脱炭層深さは増加し、炉内保持時間60分でレール鋼試験片に500 $\mu\text{m}$ の脱炭層が形成されることがわかった。

### (3) 実レールに形成された脱炭層の比較

本熱処理試験でレール鋼試験片に付与した脱炭層が実レールに形成した脱炭層の状態を再現できているかどうかを検討する。図-10に新品の普通レール表層に形成された脱炭層の様子を示す。この新品レールの脱炭層深さは270 $\mu\text{m}$ であり、炉内保持時間30分の試験片に形成された脱炭層深さ(280 $\mu\text{m}$ )とほぼ等しい。なお、レールの製造ロットによっては脱炭層の程度は変わることが推測され、必ずしもすべてのレールに図-10に示すような脱炭層が形成されているものではない。3章4節の図-6(a),(b),(c)から観察される脱炭層と同様に、実レール表層にネットワーク状のフェライト組織が観察された。また図-6(d)では実レールでは観察されなかった帯状の脱炭領域が観察されたが、それより深い位置では実レールと同様のネットワーク状のフェライト組織が観察された。

さらに図-11に、この新品レールの表層から深さ方向の硬さ分布を測定した結果を示す。表面からの深さ50 $\mu\text{m}$ では約210HVで、脱炭層が形成されている範囲の硬さは約210HV~250HVであり、3章4節の図-8の炉内保持時間15分および30分の硬さ分布と同様の傾向がみられた。このことから、本熱処理条件では実レールに形成された脱炭層を再現することが出来ると考えられるが、炉内保持時間が長くなるほどネットワーク状のフェライト組織が脱炭によって拡大し、実レールでは観察されない帯状のフェライト組織が生成することに注意する必要があることが分かった。

今後はこの結果を参考に、レール鋼から採取した円筒試験片に熱処理を施して脱炭層を付与し、転がり接触試験を実施することで脱炭層が転がり接触疲労起因のき裂の発生に及ぼす影響について検討する予定である。

## 5. おわりに

レール表層に形成された脱炭層が転がり接触疲労起因のき裂発生に与える影響を室内試験機を用いて評価するために、レール鋼表層に脱炭層を付与する熱処理条件を検討し、熱処理試験を実施した。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 1,000 $^{\circ}\text{C}$ に加熱した炉にレール鋼試験片を入れ、炉内に15分、30分、45分、60分保持した後にレール鋼試

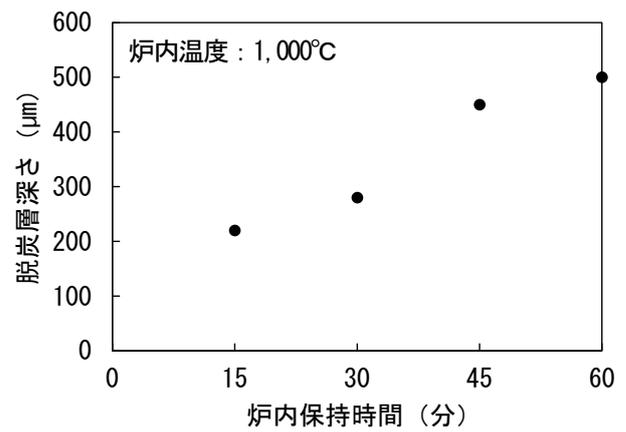


図-9 炉内保持時間に伴う脱炭層深さの変化

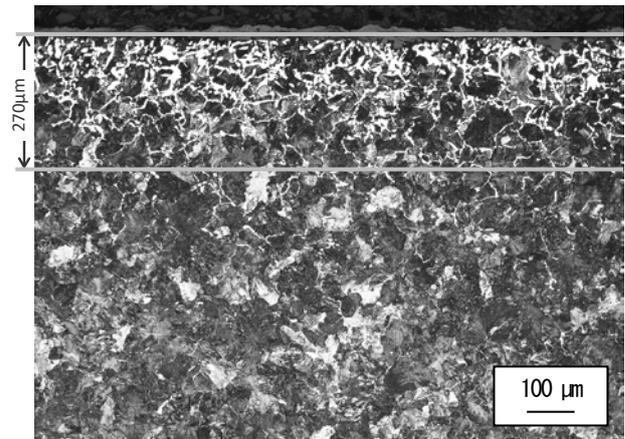


図-10 新品レール表層に形成された脱炭層の金属組織写真 (脱炭層深さ 270 $\mu\text{m}$ )

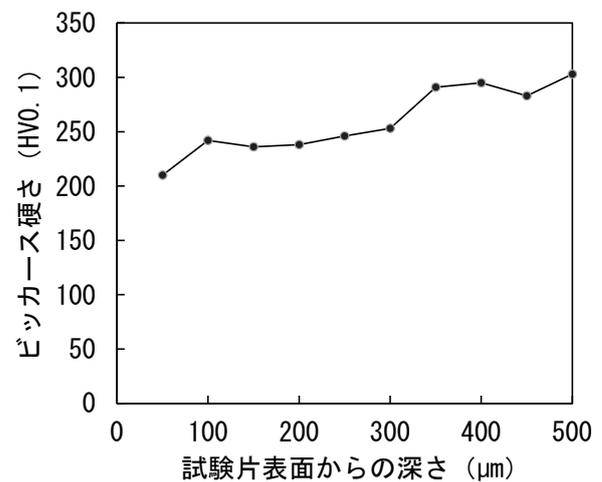


図-11 新品レールの表層から深さ方向の硬さ分布

験片を炉冷させる熱処理試験を実施した結果、試験片表層からネットワーク状のフェライト組織が観察された。さらに炉内保持時間が延びるに伴いネットワーク状のフェライト組織が試験片のより内部で観察された。また試験片表層から深さ方向に硬さ試験を行った結果、炉内保持時間の増加に伴い試験片表

層がより内部まで軟化している傾向がみられた。ISO5003の規定を参考に、熱処理試験後のレール鋼試験片表層に脱炭層が形成されていることを確認した。また炉冷することで熱処理後の試験片でパーライト組織が観察されたことから、レール鋼のパーライト組織と同様の金属組織を得た上で、表層に脱炭層を付与することができたと考ええる。

- (2) 熱処理試験後のレール鋼の金属組織写真から、ISO5003に規定される手法を用いて炉内保持時間ごとの脱炭層深さを測定した。ネットワーク状のフェライト組織の深さは保持時間15分から順に、220 $\mu\text{m}$ 、280 $\mu\text{m}$ 、450 $\mu\text{m}$ 、500 $\mu\text{m}$ と測定された。炉内保持時間の増加に伴い脱炭層深さは増加し、炉内保持時間60分で500 $\mu\text{m}$ の脱炭層が形成されることが分かった。
- (3) 本熱処理条件で実レールと同様の脱炭層を再現することができると考えられるが、炉内保持時間が長くなるほどネットワーク状のフェライト組織が脱炭によって拡大し、実レールでは観察されない帯状のフェライト組織が生成することに注意する必要があることが分かった。今後はこの結果を参考に、レール

鋼から採取した二円筒試験片に熱処理を施して脱炭層を付与し、転がり接触試験を実施することで脱炭層が転がり接触疲労起因のき裂の発生に及ぼす影響について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) ハウフェ：工具鋼の熱処理，pp.13-14，朝倉書店，1961.
- 2) 不二越熱処理研究グループ：知りたい熱処理 基礎編，pp.160-165，ジャパンマシニスト社，1971.
- 3) 今井啓貴，山根寛史，高尾賢一：シェリング傷の発生傾向に基づくレール削正計画の検討と試行，新線路 第70巻3号，pp.15-17，鉄道現業社，2016.
- 4) 須藤一，菊池實，牧正志，佐久間健人，田村今男，田中良平：講座 現代の金属学 材料編第4巻 鉄鋼材料，pp.27-29，日本金属学会，1999.
- 5) ISO 5003 : Flat bottom(Vignole) railway rails 43 kg/m and above, 2016.

(2019.4.5 受付)

## INVESTIGATION OF EFFECT OF HEAT TREATMENT CONDITION FOR RAIL STEEL ON DECARBURIZED LAYER FORMATION

Hidenori NISHIMURA, Shigekatsu KIMURA, Yoshikazu KANEMATSU  
Masahiro TSUJIE and Motohide MATSUI

A decarburized layer is formed at the rail surface when a steel maker manufactures the rail. Since the carbon content of the decarburized layer is lower than that of the base material of the rail, the material strength of the decarburized layer is lower than that of the base material. Though there is a possibility that the decarburized layer has an effect on the occurrence of the rolling contact fatigue (RCF) cracks between a rail and a wheel, the effect has not been investigated sufficiently. And in order to evaluate the effect of the decarburized layer on RCF cracks by using an indoor testing machine, we need to construct a heat treatment condition under which the decarburized layer can be formed on the rail steel. In this study, we investigated the heat treatment condition under which the decarburized layer can be formed on the rail steel surface, and observed the decarburized layer after the heat treatment test. As a result, varied decarburized layers could be reproduced by putting rail steels in a furnace at 1,000°C, changing the holding time in the furnace before cooling it inside the furnace.