

# Study on the formation mechanism of lamellar interfacial structure in pearlitic steel based on the crystallographic analysis

小坂, 誠

<https://hdl.handle.net/2324/4784652>

---

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士

バージョン :

権利関係 : Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

氏 名 : 小坂 誠

論 文 名 : Study on the formation mechanism of lamellar interfacial structure in pearlitic steel based on the crystallographic analysis  
(結晶学的解析に基づくパーライト鋼ラメラ界面組織の形成機構に関する研究)

論 文 要 旨 :

パーライト鋼は体心立方 (bcc) 構造の  $\alpha$  鉄 (フェライト) と  $\text{Fe}_3\text{C}$  炭化物 (セメンタイト、 $\theta$ ) の層状複合 (ラメラ) 組織から成る構造用鉄鋼材料である。この鉄鋼材料は高価な合金添加をほとんど必要とせず優れた加工硬化能を発現するため、冷間伸線により加工強化され、橋梁用鋼線、PWS (パラレルワイヤストランド)、自動車用スチールラジアルタイヤの補強用コード、さらには種々の鋼索用素線などのテンションメンバーとして大量に使用されている。また、鉄道車輪やレールにも、使用中に表面硬化を生ずるパーライト鋼が専ら適用されており、パーライト鋼の材料組織については古くから多くの研究がなされてきた。しかし、その優れた機械的特性を発現させる原理や、材料組織との関係については必ずしも明確になっていない。

本論文は、パーライト鋼の研究に新たな知見を加えるべく、その微細さから回折パターンを得ることが不可能であるとされてきた電子線後方散乱回折 (EBSD) によるラメラセメンタイトの結晶方位解析に挑戦し、ラメラ界面構造の形成機構を解明することを目的とした研究をまとめたものである。

第 1 章では、パーライト鋼の組織学および結晶学に関する先行研究事例を、光学顕微鏡 (OM)、透過電子顕微鏡 (TEM)、走査電子顕微鏡 (SEM)、X 線回折 (XRD)、EBSD などの手法の発展とともに概観し、本論文の目的と構成を述べている。

第 2 章では、フェライト/セメンタイトラメラ界面における二相間の結晶方位関係を利用した 3 次元のラメラ組織形態評価について述べている。EBSD により、過共析鋼のパテンティング組織における両相の結晶方位を取得し、測定領域で Pitsch-Petch の結晶方位関係が成立することを確認した。その上で、ラメラセメンタイトの晶癖面

である(010)<sub>0</sub>の配向（観察面に対する傾き）をトレースすることにより、ラメラ界面の三次元形状を推定した。その結果、ラメラ界面は異方的な曲率をもった曲面であり、その最大曲率はセメンタイトの  $a$  軸を中心軸としたものであることを明らかにした（なお、セメンタイトは直方晶系に属し、本論文では、 $a = 0.509 \text{ nm}$ 、 $b = 0.6744 \text{ nm}$ 、 $c = 0.4526 \text{ nm}$  として結晶方位などの表記を行っている）。これまで、その組織の微細さからラメラセメンタイトでの EBSD 測定による非弾性散乱回折パターンの取得が困難であるため、明確な方位マップの取得は半ばあきらめられてきた。本研究による EBSD 測定試料作製の高精度化や、EBSD データ取得方法の高度化、EBSD データ取得領域選択の工夫などにより、ラメラセメンタイトの結晶方位情報取得を世界にさきがけて行い、3次元ラメラ界面形態の測定が可能となった。

第3章では、パーライト鋼を長時間焼鈍することで得られる球状化セメンタイト組織について、広域にわたるフェライト、セメンタイトの結晶方位マップをもとに、Bagaryatsky (BA)、Isaichev (IS)、Pitsch-Petch (PP) によって報告されている複数種のフェライト/セメンタイト結晶方位関係が同一 EBSD 測定領域内に共存することを見出した。このとき、ある結晶方位関係から別の結晶方位関係への遷移はフェライトの小傾角粒界で起こっていることが多く、その遷移は以下の3つのタイプに分類されることを明らかにした。Type 0：結晶方位関係は変化せず、セメンタイトの異なるバリエーション（各結晶軸の向き）が入れ替わるもの。Type 1：結晶方位関係の変化はわずかであるが、晶癖面を大きく変化させるもの（BA-IS 遷移など）、Type 2：双方の結晶方位、方位関係ともに大きく変化するもの（IS-PP 遷移など）。本研究により、パーライト鋼における結晶方位関係の広域的な分布状態が初めて明確になった。

第4章では、パーライト鋼のラメラフェライト/セメンタイト界面においてさらに微細な結晶方位分布の状態を調査した。上述の3つの方位関係（BA、IS、PP）に加えて従来未確認であった方位関係（UK）を含めて計4種類の結晶方位関係がひとつの EBSD 測定視野内に共存することを明らかにした。単一のパーライトコロニー（ラメラフェライトが単一結晶方位の領域）内の結晶方位関係に限定すると、BA-IS または

PP-UK の組み合わせのどちらかで結晶方位関係が共存していることを認めた。さらに、フェライト/セメンタイト界面のジグザク形状は、セメンタイトの(010)<sub>θ</sub> または(011)<sub>θ</sub> の組み合わせとして説明できること、および露頭したセメンタイト表面のレッジ（階段状）構造は[100]<sub>θ</sub> に沿って形成していることが多いことを示した。以上より、結晶方位関係が互いに近い BA と IS、あるいは PP と UK が交互にラメラ界面上に出現することが、曲面形状を有するラメラ形態形成の素過程になっていると推論した。この研究により、単一コロニー内のラメラ界面においてさえも、電子顕微鏡で確認可能な非常に短い空間周期で複数の結晶方位関係が交互に現れる可能性があることを、ラメラ界面の形状と結晶方位関係の明確な対応によって初めて明らかにしている。

第 5 章では、本研究で得られた知見と意義をまとめて総括としている。