

削正能力を高めたレール削正用砥石の開発

兼松 義一* 佐藤 幸雄*

Development of Grinding Stones Improving Efficiency of Rail Grinding

Yoshikazu KANEMATSU Yukio SATOH

Rail grinding has been involved as one of the maintenance operations to mitigate rail damages such as shelling and corrugation. In order to improve the efficiency of grinding operation in the field, we developed new grinding stones and evaluated their performance in this study. We verified that the developed grinding stone had an improved grinding capability compared with the current grinding stone. Based on these results, these results show that the developed grinding stone has a potential in future introduction for field grinding operations.

キーワード：レール削正，レール削正用砥石，金属組織観察，結晶方位解析

1. はじめに

レールのシェリング損傷や波状摩耗の抑制を目的として、レールを砥石で研削加工する「レール削正」が実施され、新幹線で効果を発揮している¹⁾。そして、在来線においてもレール削正が実施され始めている。

レール削正の課題の一つとして、削正後のレール頭頂面には、削正痕による粗さやうねりが連続的に形成され、その周期と列車速度の関係によっては騒音が発生する場合がある²⁾。この対策として、削正車の移動速度を調整し、形成される削正痕の周期を制御することが有効であることが確認されている²⁾が、移動速度を遅くすると、作業時間当りの削正可能な距離（以下、削正延長と称す）が短くなり、保守コストの増大につながる。一方、移動速度を速くすると、研削時間が短くなり、削正量の減少が懸念される。移動速度を速めつつ、所要の削正量を確保するためには、現用の削正用砥石よりも研削時間当たりの削正量（以下、削正能力と称す）が優れた砥石が必要となる。レール削正の分野では、夜間の限定された時間内で行う必要性から、より削正延長を延ばすための効率的な削正方法への改良などの取組み^{3), 4)}がなされてきたが、削正能力向上を目指した砥石の材料開発に関する取組みはほとんど行われて来ていない。そこで本研究では、移動速度を速め研削時間が短くなる条件下においても十分な削正量を確保できるような削正能力の高い砥石材料を開発した。また、その性能評価およびレールへの影響を材料学的な解析により明らかにした。

2. 開発砥石の仕様

砥石は、高速回転しながら無数の砥粒が連続的に被削物を研削加工する工具である。砥粒は、加工作業が進むに従って摩滅や脱落しながら、常に新しい砥粒によって被削物を加工する特徴を持つ（自生作用という）。図1に砥石の構成の模式図を示す。砥石の性能は、砥粒、結合材および気孔の三要素で決定される。この三要素を適宜調節することで、被削物および加工の目的に適した砥石を選択することができる。本研究では、まず現用砥石（ASI社製タイプ15）の砥粒の種類、粒度、結合度などの分析を行い、現用砥石と同等性能を有すると考えられる砥石（開発砥石 No.1）を開発した。そして、開発した砥石を基準とし、砥粒の種類、粒度、結合度の異なる7種類の砥石を開発した。砥石の形状は、削正車に取付けが可能となるように、現用砥石と同じとした。表1に開発砥石の仕様の一覧を示す。「粒度」は砥粒の大きさを表し、数値が大きいほど砥粒の粒径は小さい。砥粒が大きい

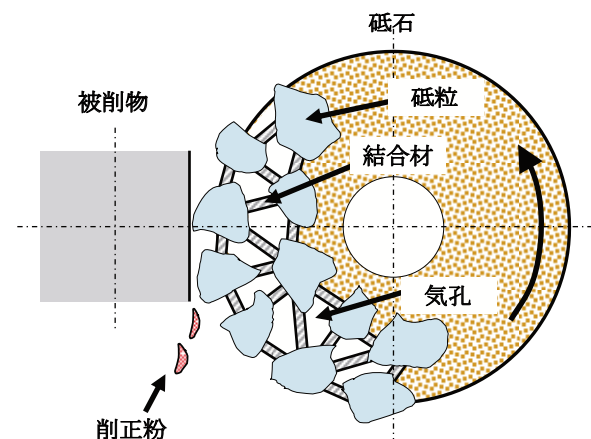


図1 砥石の構成の模式図

* 材料技術研究部（摩擦材料）

表1 開発砥石の仕様

No.	砥粒	粒度	結合度	開発の狙い
1	ジルコニア/アルミナ系	20	Q	現用砥石と同等性能品を目指した砥石
2	ジルコニア/アルミナ系	20	Q	No.1 砥石より切削性能の向上を重視 ※結合材の変更
3	ジルコニア/アルミナ系	20	O	No.1 砥石より自生作用が強い
4	微細結晶アルミナ系	20	O	No.3 砥石より切削性能の向上を重視
5	微細結晶アルミ系	20	Q	No.4 砥石より砥石寿命延伸を重視
6	ジルコニア/アルミナ系	20/24	P	No.2 砥石より自生作用が強い・仕上げ精度向上を重視
7	微細結晶アルミナ系	20/24	P	No.6 砥石より切削性能の向上を重視
-	ジルコニア/アルミナ系	20	Q	現用砥石

と1個の砥粒あたりの仕事量は大きくなり削正量増大に寄与するが、表面仕上げの精度は悪くなる傾向がある。「結合度」は砥粒どうしの結合の強さ(砥石の硬さ)を表し、上述した自生作用に影響する。結合度はアルファベットで表記され、O, P, Q, Rの順で硬いことを表す。結合度が高いほど、砥石の摩滅が少ないため砥石寿命が長くなる傾向にあるが、被削物・研削条件によっては、砥粒が脱落しづらくなり、目詰まりによって削正量が低減する場合がある。

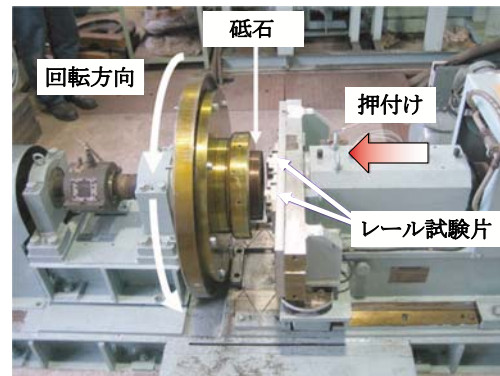


図2 試験機の外観

3. 砥石の性能評価

3.1 試験機および被削材

開発した7種類の砥石について、削正能力を評価することを目的としてレール削正作業の状態を模擬した室内試験を実施した。試験機は、鉄道総研所有の小型摩擦摩耗試験機(最高回転速度:2500rpm, 最大押付け力:2000N)に開発砥石および被削材であるレール試験片を取り付け、レール削正作業の状態を模擬できるように改良した。図2に試験機の外観を示す。試験機は、砥石を水平軸で回転させ、レール試験片2個を同時に砥石に押し付ける構造となっている。実際の削正作業では、削正車が移動しながら削正がなされているが、本試験機ではレール/砥石は相対運動しない。また、被削材(レール試験片)はJIS E 1101に規定される60kg普通レールの未使用品の頭部から試験片を採取した。図3にレール試験片の採取位置および形状を示す。

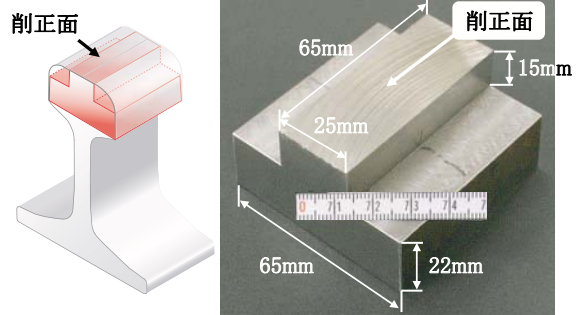


図3 レール試験片採取位置と形状

3.2 試験条件の設定

砥石の削正能力を評価するためには、実際の削正状態を再現することが重要であり、砥石の性能評価のための試験条件は、実際のレール削正作業に近い条件が必要である。しかしながら、実際の削正車での削正条件をそのまま試験機で再現することは難しい。一方、研削加工によって排出される削正粉は、加工条件(砥石回転速度・押付け力

など)によって様々な形態(大きさ・形状)を呈する。本研究では、この削正粉に着目し、削正車によって採取された削正粉と試験機で押付け力や砥石の回転速度を変えて削正した後に採取した削正粉を比較し、より形態が類似した削正粉が得られる条件を試験条件とすることとした。

3.2.1 削正粉の採取のための現地調査

削正車によって削正された削正粉を採取するため、現地調査を実施した。削正車は16頭式で、ゲージコーナを削正することに特化した「スペシャル砥石」は装着していない。削正粉の採取位置は、削正車通過後のレール頭頂面およびレール腹部・底部に残存していたものである。なお、通常の削正作業は散水状態で行われるが、今回の調査では、削正粉の散逸を防止するために散水する

ことなしに削正作業が行われた。図4に採取された削正粉の顕微鏡観察の例を示す。採取された削正粉は砥石の切れ味が良好であるときに発生するリボン状のような切りくずは少なく、むしり形や研削熱によって切りくずが溶融し、球状になった溶融形のもの多く観察された。

3.2.2 試験機による各種条件下での削正粉採取

試験条件は、押付け力は200N、500N、1000Nの3段階を設定し、それぞれの押付け力において回転速度を500rpm、1000rpm、2000rpmの3段階に設定した。したがって合計9通りの試験条件で、レール試験片の削正を実施した。削正粉は、各試験後に砥石/試験片の直下から採取した。図5に、試験機による削正粉の一覧を示す。砥石の回転速度を変化させると、高速になるに従い細かい球状の削正粉が多く排出される傾向が認められる。一方、押付け力を変化させても、削正粉の形態に明瞭な変化は認められなかった。図6に削正粉を比較して示す。図6(a)は削正車による削正後に採取した削正粉の代表例、図6(b)は試験機による削正後（押付け力500N・回転速度500rpm）に採取した削正粉を示す。削正粉の形態を比較した結果、図示した押付け力500N・回転速度500rpmの削正粉が最も削正車による削正粉と状態に近いことから、この条件を試験の条件とした。

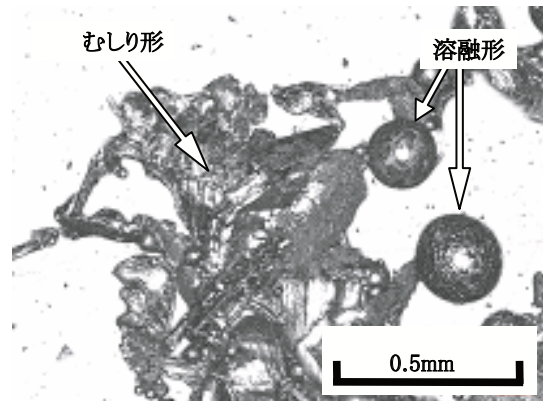


図4 削正車によって採取された削正粉の代表例

3.3 砥石の性能評価試験結果

上述の試験条件を適用して、各開発砥石および現用砥石について試験を行った。表2に試験条件を示す。試験機は押付け時間の制御が可能のため、各砥石とも押付け時間は同一とした。1回の押付け時間は6秒とし、60秒間隔で10回繰り返した。本試験機では、砥石/レール試験片は、削正車による削正作業のように相対運動しない。そこで、砥石と試験片の削正面とのなじみを解消するため、10回繰り返押し付けた後、試験片の取り付け方向を逆転させた。これを1組の試番とし、合計10試番繰

		砥石回転速度		
		500rpm	1000rpm	2000rpm
押付け力	200N			
	500N			
	1000N			

図5 各種試験条件での削正で得られた削正粉の一覧

特集：材料技術

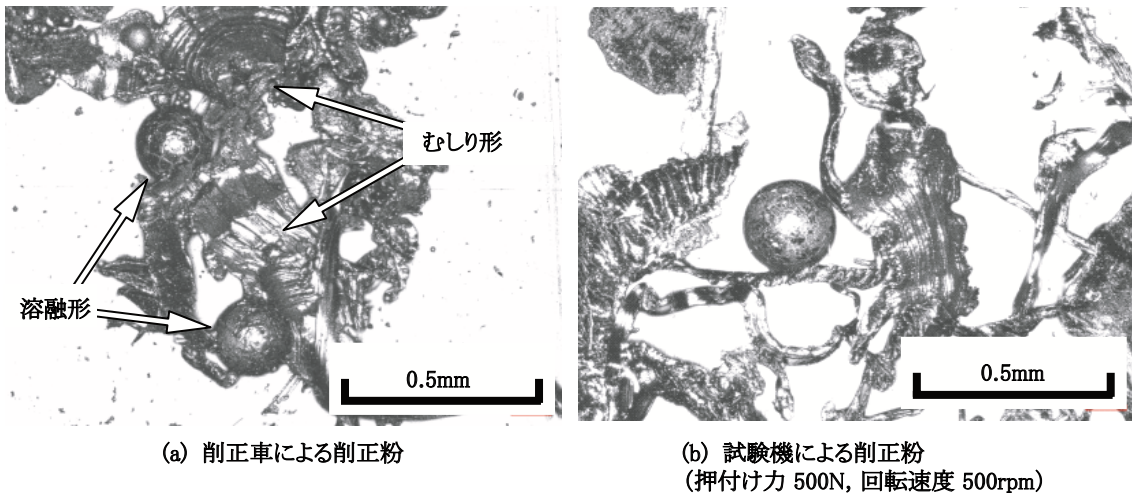


図6 削正粉の比較

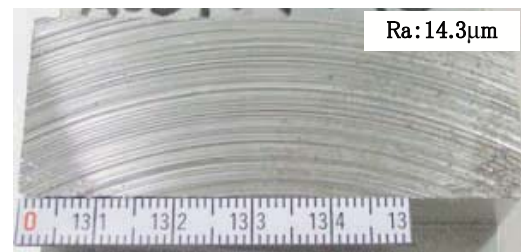
表2 試験条件

砥石回転速度	500rpm
レール試験片押付け力	500N
押付け時間 (1回)	6秒
押付け間隔	60秒
繰返し回数	10回 (=1 試番)
試番数	10
総削正時間	600秒

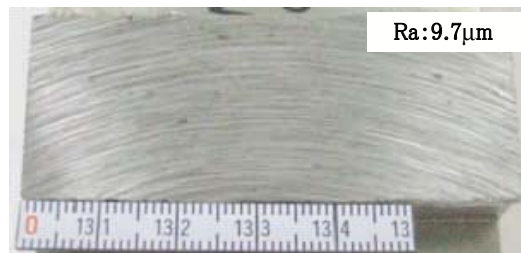
り返した。総削正時間は、試験に供したすべての砥石について一定であることから、試験前後のレール試験片の質量差は、研削時間当たりの削正量として考えられ、「削正能力」として評価した。また、同様に試験前後の砥石の質量差は「砥石寿命」として評価した。

図7に、削正試験後のレール試験片の削正面の代表例を示す。(a)は現用砥石、(b)は開発砥石No.4のものである。開発砥石を用いた場合でも、目立った削正痕や熱変質による変色は認められない。また、削正面の算術平均粗さ (Ra) を削正痕の接線方向と垂直に測定したところ、現用砥石では14.3 μm 、開発砥石No.4では9.7 μm であり、削正痕による粗さはほぼ同程度であることが確認された。

図8は各砥石の試験後のレール試験片の質量差および砥石の質量差をまとめたものである。すべての開発砥石が現用砥石の削正能力を上回っており、その中でも開発砥石No.4は最も削正能力が高いが、砥石寿命は短い。図中の実線は、現用砥石の評価点と原点を結んだものである。この直線で区切られた上側の領域であれば、砥石寿命あたりの削正能力は、現用砥石より高いこととなる。試験の結果、研削性能の向上を重視した結合材を使用した開発砥石No.2および砥粒を微細結晶アルミナ系に変更し、粒度・結合度を1段階低くした開発砥石No.7は、



(a) 現用品による削正痕



(b) 開発砥石No.4による削正痕

図7 試験後のレール試験片の削正面

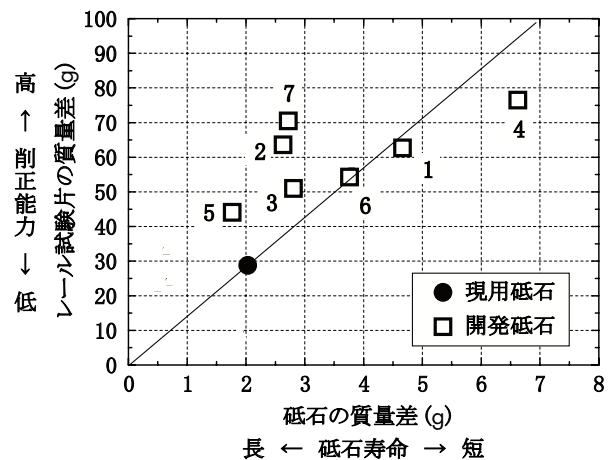


図8 砥石の性能評価試験の結果

現用砥石の2倍以上の削正能力を有し、砥石の減量も他の開発砥石よりも少ないため、効率的なレール削正が期待できるものと考えられる。

4. 研削加工によるレールへの影響の確認

研削加工は、多数の砥粒で被削物を除去するため、研削加工がなされた被削物の表層には、熱的影響を受けて研削割れや研削焼けが発生する可能性がある。そこで、金属組織を観察し、各砥石によって削正されたレール試験片の削正面近傍の熱影響や塑性流動層を確認し、開発した砥石による削正がレールにおよぼす影響を確認した。また、研削加工の熱影響の程度によっては被削物表層および内部に残留応力（ひずみ）が蓄積される場合があり、このひずみの蓄積はレール頭頂面からのき裂発生の原因となりうる可能性が懸念される。そこで、結晶方位解析を実施し、レール試験片表層のひずみの有無を確認し、併せて集合組織および組織微細化の有無についても確認した。観察に供したレール試験片は、現用砥石および開発砥石No.4によって削正されたものとした。開発砥石No.4は、開発砥石中最も削正量が多く、レール試験片への研削加工の影響も大きいと考えられるため、観察に供した。

4.1 金属組織観察

観察面はレール試験片幅中心の削正痕に沿った面とした。図9に観察位置の模式図を示す。なお、金属組織は、観察面を鏡面研磨後、3%硝酸アルコール溶液を用いて現出した。図10にレール試験片の金属組織を示す。現用砥石および開発砥石によって削正された両レール試験片の削正面表層に、熱の影響を受けた履歴を示す白色層が確認され、その厚さは現用砥石では約10 μm 、開発砥石No.4では約5 μm 程度であった。また、白色層直下には研削方向に塑性流動が形成されており、その深さは、現用砥石では約30 μm 、開発砥石No.4では約20 μm であった。金属組織観察の結果、開発砥石のほうが若干ではあるが白色層ならびに塑性流動層が浅いが、研削加工によるレールへの影響の程度はほぼ同程度と考えられる。

4.2 結晶方位解析

前項と同じ観察面について、電子線後方散乱パターン(EBSP:Electron Back Scattering Pattern)による結晶方位解析を実施した。EBSPによる結晶方位解析とは、結晶材料に電子線を照射すると極く表層から「菊池線⁵⁾」と呼ばれる反射線が現れ、その菊池線をコンピュータによる画像処理および数値計算によって評価領域内の結晶粒の大きさや方向を解析する手法である。評価領域は、前項の金属組織観察で確認された塑性流動層の深さを考慮し、かつ研削による熱影響が及ばない深さを想定し、レール試験片表層を含む深さ200 μm 、横370 μm とした。また、電子線照射間隔は、微細化した金属組織を検出できるように1 μm とした。

図11に、評価領域内の結晶方位画像を示す。ここでは、

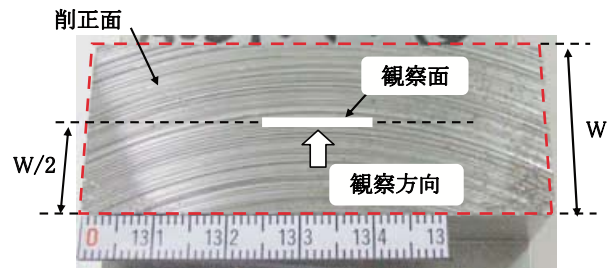
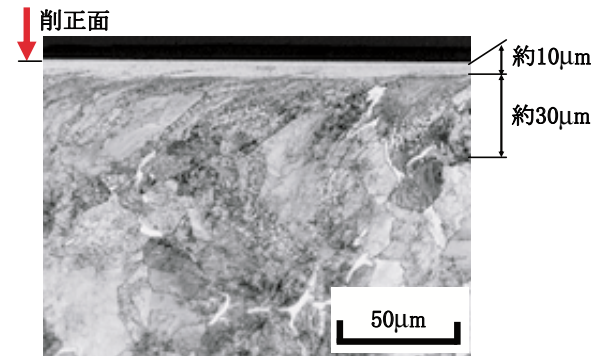
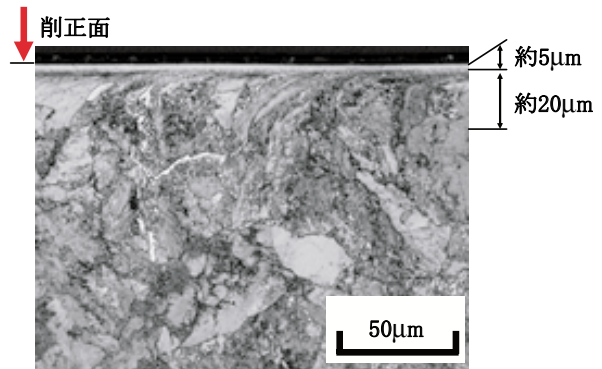


図9 金属組織およびEBSP観察位置の模式図



(a) 現用砥石



(b) 開発砥石No.4

図10 削正後のレール試験片の金属組織観察

金属組織を構成する結晶粒の大きさとその方位を読み取ることができ、各色で表現された部分が一つの結晶粒であり、色は方位を表す。現用砥石および開発砥石によって削正されたどちらのレール試験片にも表面付近には金属組織が微細化したように表現された部分が認められる。この部分は、熱影響を受けた白色層と塑性流動によって組織が微細化した部分が重畳して観察されている。なお、白色層からは、回折パターンが得られず、ノイズとして解析されている。塑性流動層よりも深い領域では、結晶粒の微細化や集合組織(評価領域が単一色で表現される)は認められず、レール母材のままの状態であり、研削による影響は認められない。

図12に評価領域内のイメージオリティマップ(IQM:Image Quality Map)を示す。IQMは、菊池線の鮮明度を濃淡で表している。ひずみの蓄積や転位の集積、粒界の存在によって菊池線が不鮮明な場合には、濃く表示される。現用砥石および開発砥石によって削正された

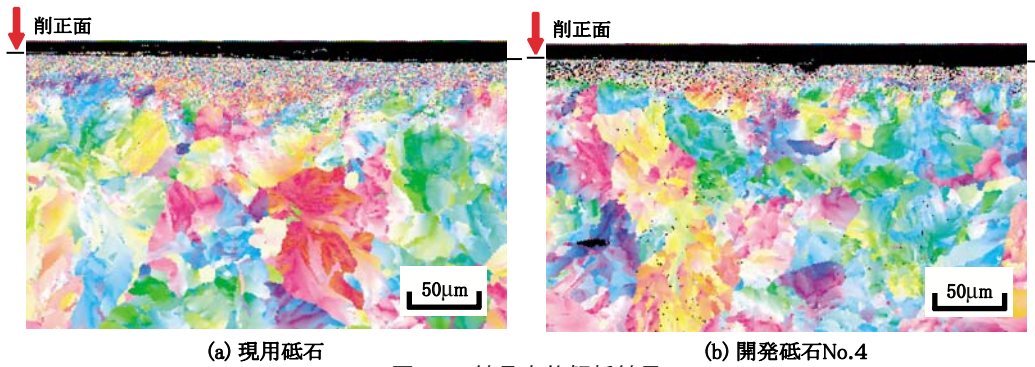


図 11 結晶方位解析結果

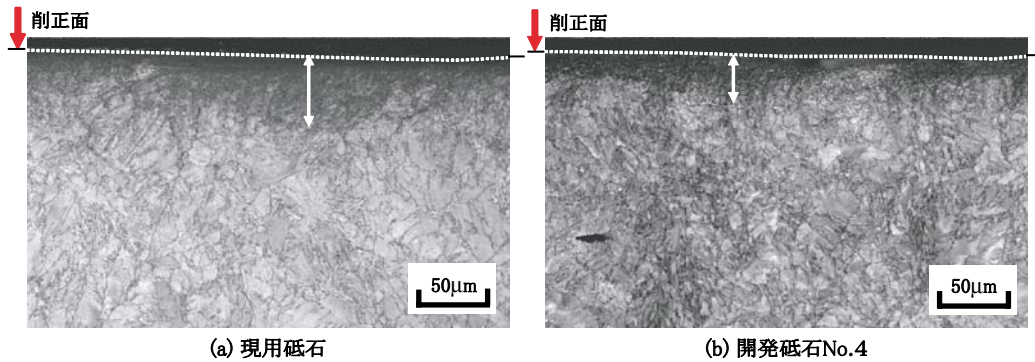


図 12 イメージオリエンティマップ

どちらのレール試験片にもレール母材よりも暗く表現(図中矢印領域)されているが、これは上述した熱影響層と塑性流動によって組織が微細化したためであり、ひずみの蓄積などによって濃く表示された領域は認められない。

4.3 開発砥石のレールへの影響について

金属組織観察および結晶方位解析の結果、開発砥石中最もレール試験片への研削加工の影響が大きいと考えられる開発砥石No.4においても、研削加工によるレールへの影響の程度は現用砥石とほぼ同程度であり、実際のレール削正に開発砥石を適用しても問題ないと考える。

5. まとめ

本研究では、砥粒の成分、粒径、結合剤および結合度の違う現用砥石よりも削正能力の高い砥石を新たに開発し、それらについて性能評価試験を実施し、削正能力の評価を行った。また、試験に供したレール試験片の材料解析を実施し、レールへの影響の程度を確認した。

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 試験の条件設定に関して、排出される削正粉に着目し、形態が類似する試験条件を探索し、実際のレール削正状態に近い削正粉を排出する試験条件を見出した。
- (2) 試験の結果、いずれの開発砥石も削正量は現用砥石を上回った。また、削正能力に加え、砥石寿命も考慮した結果、研削性能の向上を重視した結合材を使用した開発砥石 No.2 および砥粒を微細結晶アルミ

ナ系に変更し、粒度・結合度を1段目低くした開発砥石 No.7 は特に効率的な削正が期待できるものと考えられる。

- (3) 試験に供したレール試験片について材料解析を実施した結果、研削加工による熱影響層の深さおよび塑性流動層が形成された深さは、現用砥石と比較して同程度であり、実際のレール削正に開発砥石を適用しても問題ないと考えられる。

今後、本研究の結果優れた削正能力を有していることが分かった開発砥石No.2および7を削正車に搭載し、実使用条件下での削正試験を実施して、現用砥石との比較を行う予定である。

文 献

- 1) 高木眞一, 高山伴巳: 東海道新幹線におけるレール削正, 日本鉄道施設協会誌, (2003) 4, pp.281-284, 2003
- 2) 瀧川光伸, 阿部司, 小野寺孝行: 在来線レール削正による転動音変化の分析, 土木学会第 61 回年次学術講演会論文集, pp.503-504, 2006
- 3) 峰岸 大介: 新幹線のレール削正の見直し, 新線路, (2005) 8, pp.11-13, 2005
- 4) 山田知宏: 効果的な在来線レール削正方法の一考察, 新線路, (2005) 10, pp.19-21, 2005
- 5) Adam J. Schwartz, Mukul Kumar, and Brent L. Adams, Electron Backscatter Diffraction in Materials Science. Plenum Publishers, NY, U.S.A., pp.1-17, 2000.