

# パターンマッチングを用いた EBSD の指数付け結果に及ぼす マスターパターンの格子定数の影響

島山 友孝 澤田 浩太

国立研究開発法人物質・材料研究機構 構造材料研究センター

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 90 No. 1 (2026), pp. 17-26  
©2025 The Japan Institute of Metals and Materials  
Technical Article

## Effect of Lattice Parameters of Master Pattern on EBSD Indexing via Pattern Matching

Tomotaka Hatakeyama and Kota Sawada

Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047

The effects of the lattice parameter of the simulated master pattern and the EBSD pattern resolution for indexing of EBSD patterns via pattern matching (Spherical Indexing) were investigated using annealed austenitic steel. A larger deviation from the accurate lattice parameter in the master pattern resulted in a larger deviation from the true crystallographic orientation. Poorer EBSD pattern resolution resulted in a lower angular resolution, especially near the grain boundary, and increased kernel average misorientation (KAM) values. These results suggest that accurate lattice parameter and higher pattern resolution are required for Spherical Indexing to achieve a better angular resolution. Nevertheless, Spherical Indexing using a master pattern with a 15% deviation from the accurate lattice parameter and EBSD patterns with a binning of 8x8 provided a better angular resolution than traditional indexing using the Hough transformation of EBSD patterns without binning (binning of 1x1). This indicates that Spherical Indexing is an excellent indexing procedure in terms of angular resolution, which is robust for the lattice parameter of the master pattern and EBSD pattern resolution. [[doi:10.2320/jinstmet.J202528](https://doi.org/10.2320/jinstmet.J202528)]

(Received June 5, 2025; Accepted August 7, 2025; Published September 5, 2025)

**Keywords:** electron backscattered diffraction, pattern matching, Spherical Indexing, misorientation, binning, lattice parameter

## 1. 緒 言

電子線後方散乱回折法(EBSD)では、大きく傾斜した結晶性の試料に電子線を照射することで発生した EBSD パターンを収集し、パターン内のバンド(結晶面に対応する)の位置関係を基に結晶方位を決定する。格子状に測定点を設定することで得られる結晶方位のマップデータを解析すると、集合組織や粒界性格、隣接する測定点間の局所方位差など、多様な組織因子を抽出できることから、EBSD は近年の金属材料のマイクロ組織解析には不可欠な手法となっている[1]。

市販の EBSD ソフトウェアでは、パターンの収集からバンドの検出、指数付けが自動で行われる。このとき、バンドの自動検出のためにパターン画像を Hough 変換する手法が一般に用いられる。Hough 変換とは、直線を点へと変換する単純な数学的操作[2]であり、高速でのバンドの自動検出に適した手法である。その後、あらかじめ指定した結晶構造が取り得る結晶面の角度関係と Hough 変換で検出されたバンドの角度関係を照合することで結晶方位が決定される[3]。

ただし、バンドの幅やコントラストなどの影響により、Hough 変換で検出したバンドには、実際の方位から 1° 程度のランダムな測定誤差が避けられない[4]。集合組織や粒界性格の評価を行う場合には無視できる小さな誤差であるが、例えば、クリープ損傷評価を目的として、数パーセントの小さな

塑性ひずみ量を局所方位差から推定する場合[5-7]には、無視できないほど大きな誤差となる場合がある。

近年の EBSD パターンのシミュレーション技術と計算機の発達により、シミュレーションにより得たマスターパターンと実験で得たパターンとのパターンマッチングによって指数付けを行う新たな手法(Spherical Indexing)が開発された[8,9]。この手法では、一部が欠損したパターンであっても、見えている限られたパターンの特徴から指数付けが可能となることや、測定誤差が小さくなるため角度分解能が著しく向上することなどが期待される。

立方晶の結晶面の角度関係は格子定数によらないため、Hough 変換で立方晶の指数付けを行う際には結晶構造だけを指定すれば良い。一方で、パターンマッチングを用いる場合には、マスターパターンを作成する際に結晶構造に加えて格子定数を指定する必要がある。このとき、正確な格子定数が未知の合金試料に対して、便宜上、データベース上の純金属の格子定数を適用することが想定されるが、その場合の指数付け結果の信頼性は不明である。したがって、パターンマッチングを行う際のマスターパターンの格子定数の誤差が指数付け結果に及ぼす影響を定量的に把握し、生じ得る影響を知った上でデータの解析を行う必要があると考えられる。そこで本研究では、パターンマッチングを用いた EBSD の指数付け結果に及ぼすマスターパターンの格子定数の影響について調査した。

2. 実験方法

1503 K で溶体化後、水冷された 25Cr-20Ni-Nb-N 鋼(火 SUS310J1TB)の Tube 材を供試材とした。化学組成を Table 1 に示す。

耐水研磨紙、ダイヤモンドペーストおよびコロイダルシリカを用いたバフ研磨により鏡面研磨した試料を用いて、X 線回折法(XRD: 柵リガク製 SmartLab)により格子定数を測定した。X 線には Cu-K $\alpha$  線を用いた。また、同試料を用いて、走査型電子顕微鏡(ZEISS 社製, Auriga Laser)に搭載された EBSD 装置(EDAX 社製, Digiview)により EBSD パターンを収集した。測定範囲は 500 $\times$ 500  $\mu$ m, ステップサイズは 2.5  $\mu$ m とした。パターンの Binning を Table 2 の通りに変化させ、4 条件ではほぼ同じ視野でマップを取得した。Binning が小さいほど測定速度は低下し、ファイルサイズは大きくなった。

XRD で得られた 25Cr-20Ni-Nb-N 鋼の格子定数  $a$  を基に、OIM Analysis 9(EDAX 社製)および OIM Matrix(EDAX 社製)を用いて、結晶構造が面心立方格子(fcc, 空間群: Fm-3m), 格子定数が  $a, 1.01a, 1.03a, 1.05a, 1.10a, 1.15a$  となる 6 つのマスターパターンを動力学的回折理論に基づくシミュレーションにより作成し[12,13], Spherical Indexing によってパターンマッチングによる再指数付けを行った。

3. 結果と考察

供試材の XRD プロファイルを Fig. 1(a)に示す。各ピーク位置から求めた格子定数を Fig. 1(b)の通り Nelson-Riley 関数[14]に対してプロットし、 $\theta=\pi/2$  に外挿することで、供試材の格子定数を 0.3599 nm と求めた。

Fig. 2 に、試料表面近傍での電子線の回折によって生じる

Table 1 Requirement [10] and chemical composition of 25Cr-20Ni-Nb-N steel (mass %). [11]

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N
Requirement	$\leq 0.10$	$\leq 1.50$	$\leq 2.00$	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	17.00–23.00	23.00–27.00	0.20–0.60	0.15–0.35
TEA	0.06	0.41	1.25	0.018	0.001	19.84	24.60	0.46	0.272

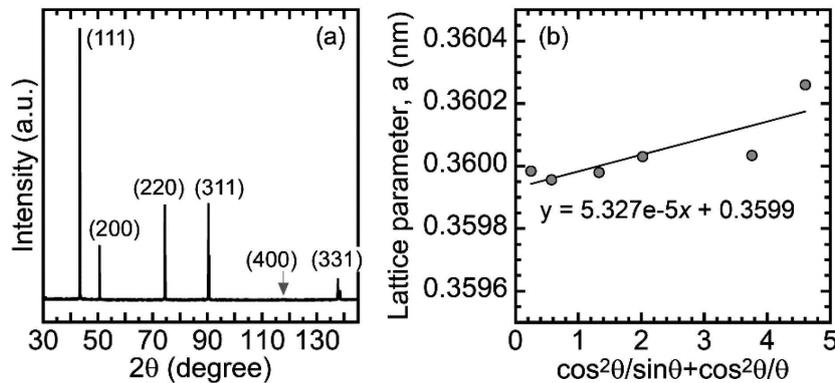


Fig. 1 (a) XRD profiles of the sample and (b) lattice constant calculation method by Nelson-Riley function.

Table 2 EBSD conditions performed in this study.

Binning	Resolution	Scan speed (fps)	File size (GB)
1x1	1392 $\times$ 1040	23	27.5
2x2	696 $\times$ 520	44	6.9
4x4	348 $\times$ 260	77	1.7
8x8	174 $\times$ 130	123	0.4

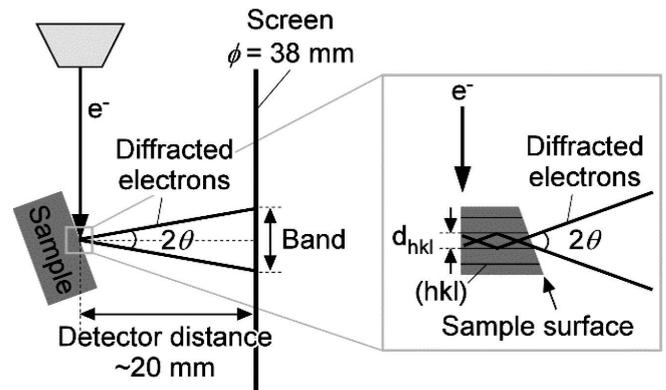


Fig. 2 Geometry of the sample, diffracted electrons, and screen in SEM chamber.

EBSD パターンが蛍光スクリーンに投影される様子を模式的に示す[15]. EBSD パターンは, 入射した電子線が試料表面近傍で散乱し, 散乱した電子が結晶面で回折して試料表面から飛び出したものである. スクリーンに投影されたパターンは, CCD カメラあるいは CMOS カメラで取得する.

( $hkl$ ) 面の面間隔を  $d_{hkl}$ , 電子線の波長を  $\lambda$  としたとき, 式(1)に示す Bragg の法則により, 角度  $\theta$  の方向に回折が生じる.

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (1)$$

このとき, 上下方向に回折された電子線がスクリーンに投影されることで EBSD パターンのバンドが形成される. したがって, EBSD パターンのバンド幅は, 回折角  $\theta$  に依存する. 式(1)より, 加速電圧が高くなると  $\lambda$  が小さくなるため,  $d_{hkl}$  が同じでも  $\theta$  が小さくなり, バンド幅は小さくなる. また, 面間隔が大きくなれば  $\theta$  は小さくなるため, バンド幅は小さくなる. このとき, 試料表面とスクリーンの距離を  $L$  としたとき, バンド幅  $w$  は幾何学的に式(2)で求められる.

$$w = 2L \tan \theta \sim 2L \sin \theta \quad (\theta \text{ は十分に小さい}) \quad (2)$$

式(1), 式(2)より, 面間隔が  $d_0$  から  $d_1$  に変化したときのバンド幅をそれぞれ  $w_0$ ,  $w_1$  とおくと,

$$w_1 = w_0 d_0 / d_1 \quad (3)$$

の関係が得られる. つまり, バンド幅と面間隔は, 反比例の関係がある. 本研究では, 格子定数が大きくなる側(バンド幅が小さくなる側)に, Table 3 に示す通り, 格子定数を最大で 15% 大きくした 6 通りのマスターパターンを作成した. 検証した格子定数の誤差の上限の 15% は, Hume-Rothery 則[16]を考慮して設定した.

Fig. 3 に, (a) 格子定数を  $a = 0.3599$  nm (XRD で求めた格子定数), (b)  $a = 0.4139$  nm (XRD で求めた格子定数 +15%)

Table 3 Lattice parameters of the master patterns prepared in this study and the deviation from the true lattice parameter.

Deviation (%)	Lattice parameter, a (nm)
0	0.3599
+1	0.3635
+3	0.3707
+5	0.3779
+10	0.3959
+15	0.4139

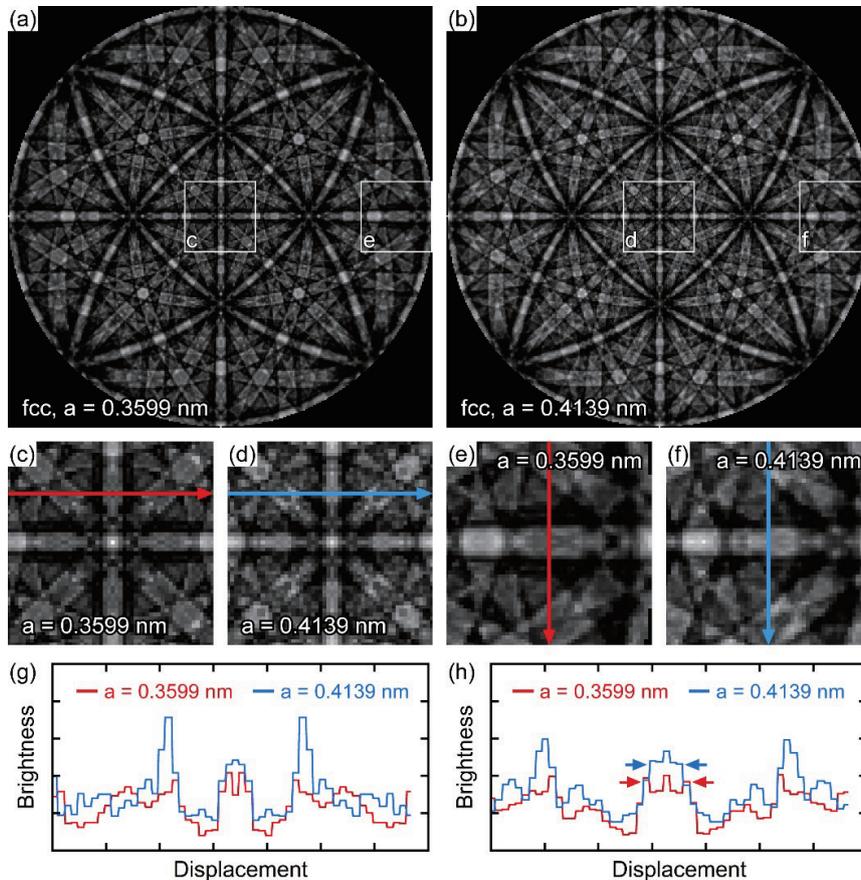


Fig. 3 Simulated EBSD master patterns for fcc with a lattice parameter of (a) 0.3599 nm and (b) 0.4139 nm. (c)-(f) Enlarged master patterns from the square box labeled as "c", "e" in (a), "d", and "f" in (b), and (g) and (h) brightness along the lines in (c), (d) and (e), (f), respectively. (online color)

として作成した fcc のマスターパターンを示す。Fig. 3(c), Fig. 3(d) と Fig. 3(e), Fig. 3(f) は、それぞれのマスターパターンの中央および右端を拡大した図である。Fig. 3(c), Fig. 3(d), Fig. 3(e), Fig. 3(f) 中の矢印に沿った輝度値の変化をそれぞれ Fig. 3(g), Fig. 3(h) に示す。格子定数によってマスターパターンのバンド内のコントラストが変化することがわかる。また、Fig. 3(h) 中央に矢印で示すように、格子定数の大きな  $a = 0.4139 \text{ nm}$  のマスターパターンでは、バンド幅が小さくなっていることが確認できる。一方で、格子定数によってバンドの中心位置やバンドが交差する晶帯軸の位置は変化しない。これは、EBSD パターンのバンドの位置は結晶面とスクリーンの幾何学的関係によって決まるためである [17]。

本研究では、格子定数の誤差に加えて EBSD パターンの解像度の影響を調査するため、Table 2 に示す通り、4 種類の Binning で EBSD 測定を実施した。Fig. 4 に、それぞれの Binning で得た EBSD パターンを示す。下段の拡大図より、Binning が大きくなるほどパターンは粗くなるのがわかる。このとき、1 本のバンド幅を表すピクセル数が変化する。Fig. 4 のパターンの中でほぼ水平方向に検出されている (202) に対応するバンドを例にとると、Fig. 4(e)-Fig. 4(h) および Table 4 に示す通り、Binning が 1x1 であれば 1 本のバンド幅が 35 ピクセルで表現されるのに対して、8x8 であれば 4 ピクセルで表現されている。したがって、バンド幅が 1 ピクセル変化するために必要な格子定数(面間隔)の変化は、Binning が 1x1 であれば  $1 \div 35 = 2.9\%$ 、8x8 であれば  $1 \div 4 = 25\%$  と見積もられる。このこ

とから、Binning が小さい方が、マスターパターンの格子定数の変化に敏感であると推察された。

Fig. 4 の (202) のように、パターン中央付近で検出された水平方向のバンドが Y 方向に 1 ピクセルだけシフトした場合の方位変化(結晶回転)は、試料表面とスクリーンの距離  $L$  を 20 mm としたとき、Binning によって決まるパターン画像の Y 方向のピクセル数とスクリーンの直径から計算される 1 ピクセルの大きさに対して、Fig. 2 より幾何学的に式 (4) で求められる。

$$\tan \theta = \text{Pixel size} = \frac{\text{Number of pixels along Y axis}}{\text{Screen diameter}} \quad (4)$$

これより、それぞれの Binning で、中央付近のバンドが 1 ピクセルだけシフトした場合に生じた方位変化は、Table 5 の通り、Binning が 1x1 であれば約  $0.1^\circ$ 、8x8 であれば約  $0.8^\circ$  と見

Table 4 Number of pixels along a band for (202) and the change in lattice parameter when the band width is increased by one pixel in each binning size.

Binning	Number of pixels along a band for (202)	Change in Lattice parameter when the band width is increased by one pixel (%)
1x1	35	2.9
2x2	18	5.6
4x4	9	11.1
8x8	4	25.0

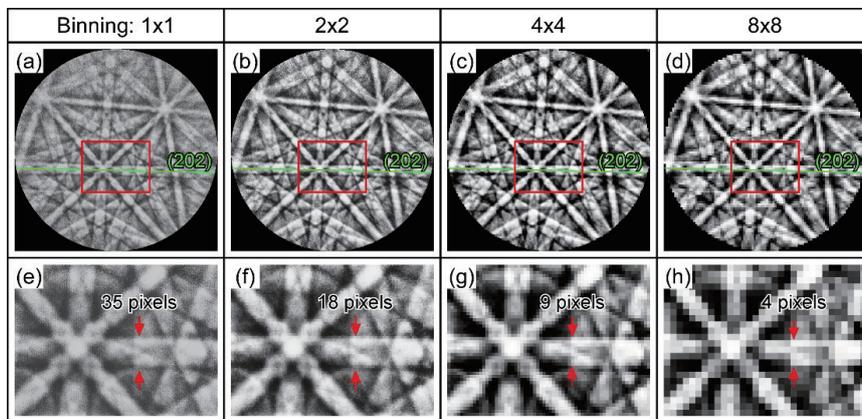


Fig. 4 EBSD patterns obtained from the binning sizes of (a)(e) 1x1, (b)(f) 2x2, (c)(g) 4x4, and (d)(h) 8x8. (online color)

Table 5 Calculations to obtain the change in crystallographic orientation ( $\theta$ ) required to detect the change in the position of the band near the center of the screen as a shift of 1 pixel.

Binning	Screen diameter (mm)	Number of pixels along Y axis	Pixel size ( $\mu\text{m}$ )	$\tan \theta$	$\theta$ (deg.)
1x1	38	1040	36.5	0.00183	0.105
2x2	38	520	70.4	0.00352	0.202
4x4	38	260	146.2	0.00731	0.419
8x8	38	130	292.3	0.01462	0.838

積もられた。このことから、Binning が小さい方が、指数付けの際の角度分解能が高くなると推察された。

Spherical Indexing によるパターンマッチングを行った際には、実験で得られた EBSD パターンとマスターパターンとの相関の度合い(信頼性指数)として、各測定点に[0, 1]の範囲で SCI(Spherical Confidence Index)と呼ばれる値が与えられる。Table 4 に示すように、マスターパターンの格子定数変化に最も敏感と期待される Binning が 1x1 のパターンに対して、Table 3 に示す 6 通りの格子定数で作成したマスターパターンを用いた Spherical Indexing により得られた SCI マップを Fig. 5 に示す。SCI は結晶粒毎に差があったが、結晶粒内でのバラつきは小さかった。今回用いた試料は溶体化まま材であり、鮮明なパターンが得られていることから、視野全体で 0.8 以上の高い SCI が得られており、マスターパターンの格子定数に関わらず精度良く指数付けが行われたと考えられた。

Fig. 6(a) に、Binning が 1x1 のときのマスターパターンの格子定数と測定視野の平均 SCI の関係を示す。a = 0.3959 nm (XRD で求めた格子定数 +10%) として作成したマスターパターンを使用したとき平均 SCI は最も高くなり、0.3959 nm からの差が大きくなるほど SCI は低下した。格子定数の差がいずれも 5% である a = 0.3779 nm (+5%) と a = 0.4139 nm (+15%) の平均 SCI は同程度であった。Fig. 6(b) に示す SCI 値のヒ

ストグラムにおいても同様の傾向が確認された。Fig. 6(c) に示す供試材の Binning が 1x1 の EBSD パターンに対して、a = 0.3599 nm と a = 0.3959 nm のマスターパターンを用いて Spherical Indexing を行った結果を Fig. 6(d), Fig. 6(e) に示す。

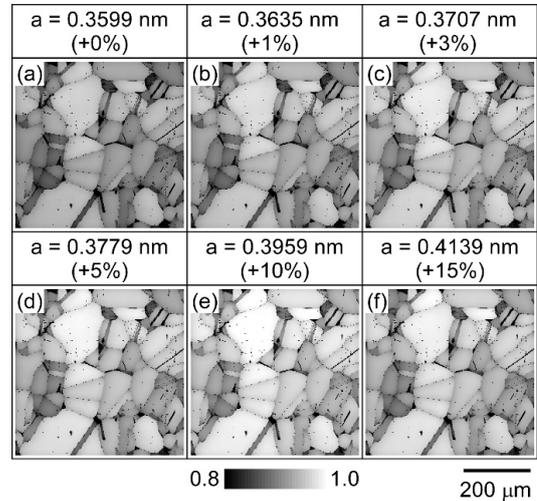


Fig. 5 SCI map of obtained by the binning size of 1x1 by the Spherical Indexing with lattice parameters of the master pattern (a) 0.3599, (b) 0.3635, (c) 0.3707, (d) 0.3779, (e) 0.3959, and (f) 0.4139 nm.

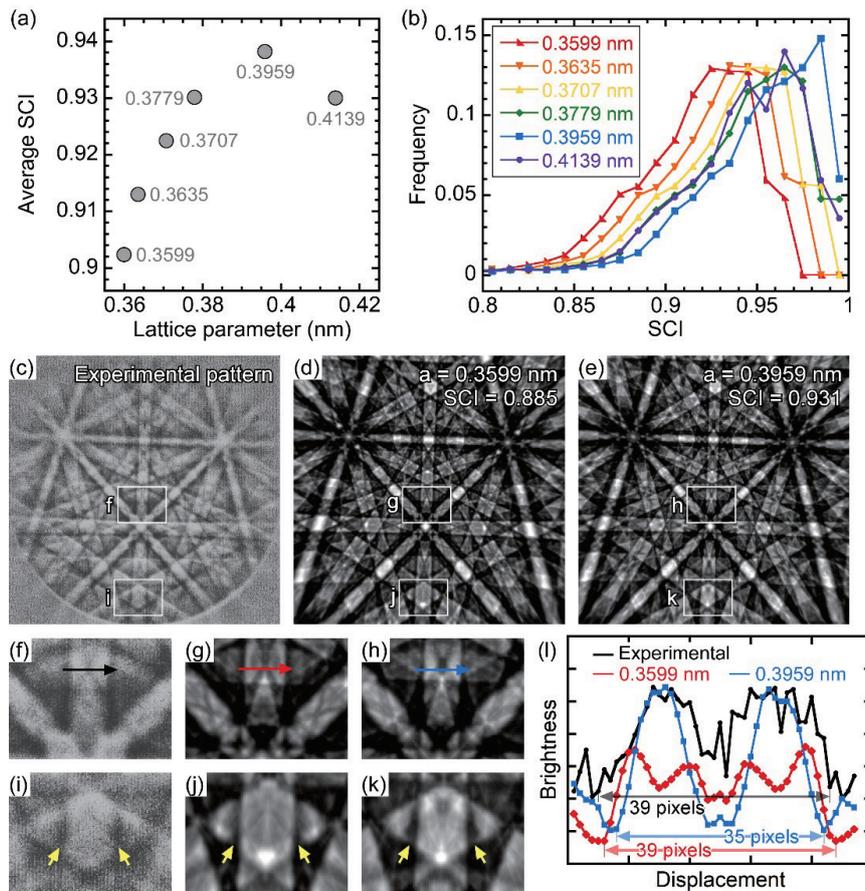


Fig. 6 (a) Relationship between lattice parameter of the master pattern and average SCI value and (b) effect of lattice parameter of master pattern on histograms of SCI values with a binning of 1x1. (c) An example of experimentally obtained EBSD pattern with a binning of 1x1, matched master patterns with a lattice parameter of (d) 0.3599 and (e) 0.3959 nm, (f)–(k) enlarged patterns from the boxes in (c)–(e), and brightness along the lines in (f)–(h). (online color)

それぞれの SCI 値は 0.885 と 0.931 である。Fig. 6(c)-Fig. 6(e) の中央の枠内の拡大図を Fig. 6(f)-Fig. 6(h) に示す。図中の矢印に沿った輝度値の変化を Fig. 6(i) に示す。供試材の EBSD パターンのバンド幅は、 $a = 0.3599 \text{ nm}$  としたマスターパターンの方が良く再現できていることがわかる。一方で、Fig. 6(c)-Fig. 6(e) の下側の枠内の拡大図である Fig. 6(i)-Fig. 6(k) に矢印で示した箇所を見ると、バンド内の細かなコントラストは、 $a = 0.3959 \text{ nm}$  としたマスターパターンの方が良く再現できているように見受けられた。このことから、バンド内の細かなコントラストを含めたパターンマッチングの結果として、 $a = 0.3959 \text{ nm}$  のときに平均 SCI が最も高くなったと推察された。一方で、パターンマッチングの結果として求められる結晶方位は、バンド幅を良く再現している  $a = 0.3599 \text{ nm}$  のときに最も正確であると考えられた。

Fig. 7 に、各 Binning で、種々の格子定数で作成したマスターパターンでの Spherical Indexing および Hough 変換で得られた Inverse pole figure (IPF) マップを示す。パターンの解像度およびマスターパターンの格子定数の影響は、IPF マップからは確認できなかった。

上述の通り、Fig. 5 および Fig. 6 に示した SCI によらず、XRD で求めた格子定数 ( $a = 0.3599 \text{ nm}$ ) で作成したマスターパターンを用いた Spherical Indexing により得られた結晶方位が、実際の結晶方位に最も近いと考えられる。そこで、それぞれの Binning で得られた各測定点のパターンを基に  $a = 0.3599 \text{ nm}$  の Spherical Indexing で得られた結晶方位と、格子定数に  $+1\sim 15\%$  の誤差を与えたマスターパターンを用いて、同一のパターンを基に Spherical Indexing および Hough 変換で得られた結晶方位との方位差を計算した。得られた結果を方位差 (Disorientation) マップとして Fig. 8 に示す。

Spherical Indexing を用いて指数付けした場合、格子定数の誤

差が大きいほど方位差は大きくなった。ただし、格子定数が  $15\%$  異なる場合でも、その方位差はほとんどの測定点で  $0.1^\circ$  未満と小さかった。Binning の影響は方位差マップでは見られなかった。このとき観察された方位差は、結晶粒毎におおむね同じ値を持っていたことから、類似したパターンを持つ同一の結晶粒内では、パターンマッチングによって再現性良く同程度の方位差が生じていると推察された。一方で、Hough 変換で指数付けした場合は、最大で  $2^\circ$  程度の方位差が確認された。

Fig. 8 に示した方位差の視野全体の平均値と、Spherical Indexing に用いたマスターパターンの格子定数の誤差 ( $\Delta a$ ) の関係を Fig. 9 に示す。  $\Delta a$  が大きくなるほど平均方位差は大きくなった。一方で、平均方位差は  $\Delta a$  が  $15\%$  のときでも  $0.02\sim 0.03^\circ$  程度であり、Spherical Indexing による方位決定精度に及ぼすマスターパターンの格子定数の影響は小さいことがわかった。

Table 4 の通り、Binning が  $1 \times 1$  であれば  $3\%$  程度の格子定数の違いがバンド幅としてパターンに現れる。しかし、Spherical Indexing では 1 本のバンド幅だけではなく、取得されたパターン全体のマッチングによって方位が決定される。Fig. 3(a), Fig. 3(b) に示す通り、EBSD パターンでは、バンドの中心位置やバンドが交差する晶帯軸の位置は格子定数によって変化しない [17]。そのため、方位決定精度に対するマスターパターンの格子定数 (バンド幅) の影響は小さかったと推察された。

一方で、Binning が大きいほど平均方位差が小さくなった。つまり、Table 5 で示唆された通り、Binning が大きいほどマスターパターンの格子定数変化に対して鈍感になることがわかった。ただし、Binning が  $1 \times 1$  と  $8 \times 8$  の平均方位差の差は  $\Delta a$  が  $15\%$  でも  $0.01^\circ$  程度と小さかった。

Fig. 8 に示した Hough 変換による方位差の度数分布を Fig. 10 に示す。Hough 変換と正確な格子定数を用いた

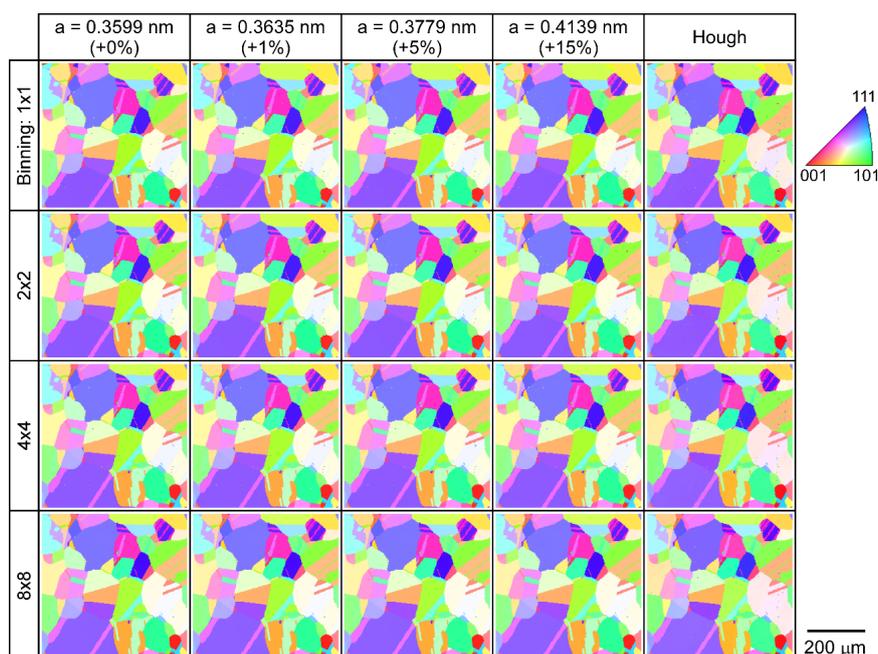


Fig. 7 Inverse pole figure (IPF) maps obtained by the binning sizes of  $1 \times 1$  to  $8 \times 8$  by the Spherical Indexing with several lattice parameters of the master pattern and Hough indexing. (online color)

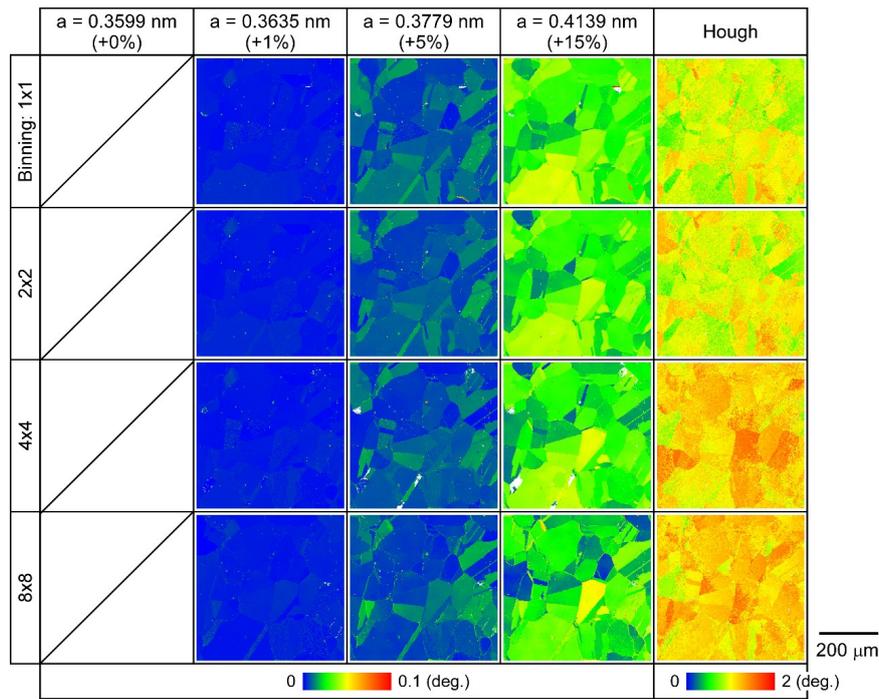


Fig. 8 Disorientation from the crystallographic orientation obtained by the Spherical Indexing with a lattice parameter of 0.3599 nm calculated against the binning sizes of 1x1 to 8x8 by the Spherical Indexing with several lattice parameters of the master pattern and Hough indexing. (online color)

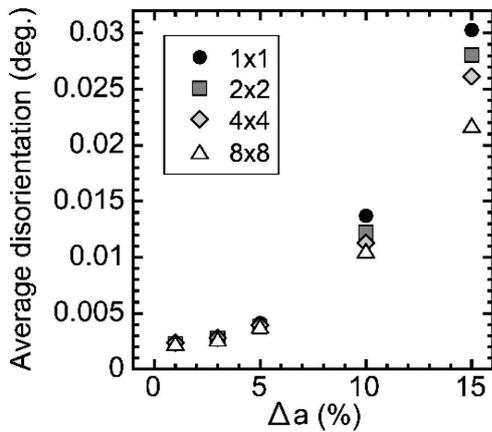


Fig. 9 Relationship between the deviation of lattice parameter of master pattern ( $\Delta a$ ) and average disorientation.

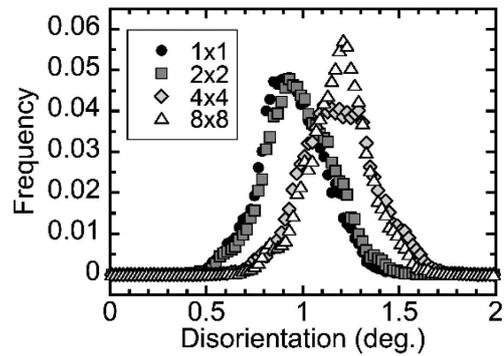


Fig. 10 Histograms of the disorientation between the crystallographic orientation obtained by the Spherical Indexing with a lattice parameter of 0.3599 nm and that obtained by Hough indexing.

Spherical Indexing を比較すると、平均で  $1 \pm 0.2^\circ$  程度の方位差が生じていることがわかる。この値は Fig. 9 に示した Spherical Indexing で決定された方位同士の方位差と比較すると大きく、これが Hough 変換による誤差に相当すると考えられる。言い換えると、Hough 変換と比較して、Spherical Indexing では高い精度で方位を決定できていることになる。

Fig. 8-Fig. 10 から議論した方位決定精度は、正確な格子定数を用いた Spherical Indexing に基づく結晶方位が正しいという仮定に基づく相対的な評価である。一方で、fcc の双晶境界が  $60^\circ$  の方位差を有することを用いると、方位測定結果の信頼性を絶対値として評価できると考えられる。そこで、1 視野あたり 40 箇所以上の双晶境界の両側の結晶方位差を

測定し、 $60^\circ$  からの差分を求めた。Fig. 11(a)-Fig. 11(d) に、Binning が 1x1 から 8x8 のときの、マスターパターンの格子定数が 0.3599 nm または 0.4139 nm での Spherical Indexing および Hough 変換による指数付け結果から得られた双晶境界における方位差の  $60^\circ$  からの差分をヒストグラムとして示す。また、Fig. 11(e) に、双晶境界における方位差の  $60^\circ$  からの差分の平均値を示す。エラーバーは標準偏差を示している。

Spherical Indexing によって得られた結果から、Binning およびマスターパターンの格子定数の影響は確認できなかった。一方で、Spherical Indexing と Hough 変換の平均方位差を比較すると、Hough 変換の方が 3 倍程度大きかった。このことから、Spherical Indexing が高い精度で方位を決定できている

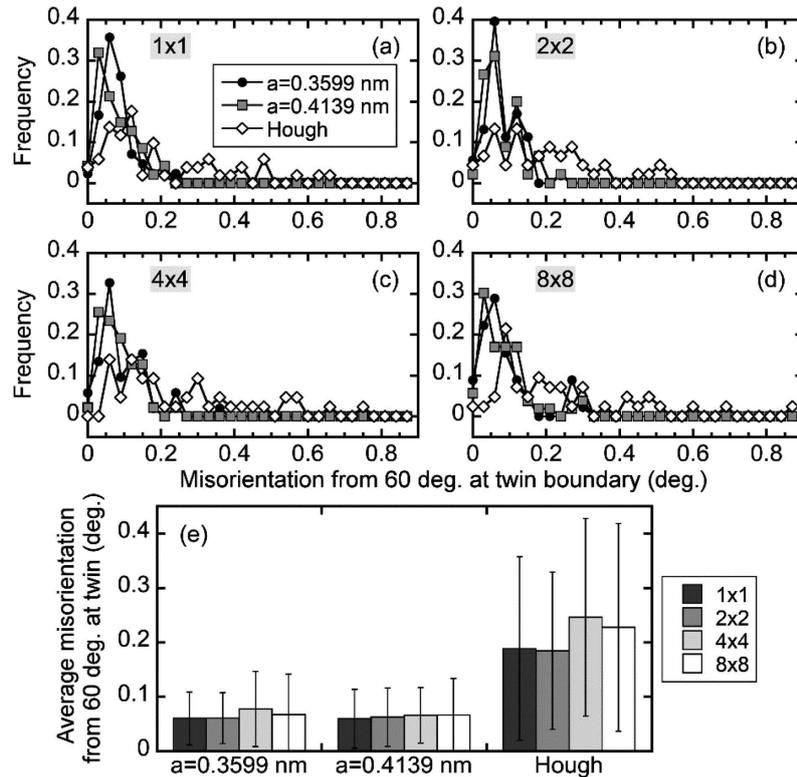


Fig. 11 Histogram of the misorientation from 60 deg. at twin boundary with a binning size of (a) 1x1, (b) 2x2, (c) 4x4, and (d) 8x8, and (e) average misorientation from 60 deg. at twin boundary.

ことを確認できた。

Fig. 12 に、各 Binning で、種々の格子定数で作成したマスターパターンでの Spherical Indexing および Hough 変換で得られた Kernel Average Misorientation (KAM) マップを示す。KAM は、測定点と、測定点に隣接する 6 点の方位差の平均値として定義される値である。隣接する測定点が粒界を跨ぐ場合は、平均値の計算から除外される。

得られた KAM マップでは、Binning が同じ場合、マスターパターンの格子定数の影響は見られなかった。一方で、KAM マップは Binning によって変化し、Binning が大きいほど特に粒界近傍の KAM が大きくなった。ただし、Binning が 8x8 の場合でも、粒界近傍の KAM はほとんどの測定点で  $0.1^\circ$  未満と小さかった。Binning は、ファイルサイズや測定・再指数付けの処理速度に影響し、実用上は Binning が大きい方が扱いやすい。Fig. 12 のように Binning によって測定結果が変化する原因は不明であるが、Spherical Indexing においては、Binning が KAM などの局所方位差パラメータに影響する可能性が示されたことから、評価したい組織因子に応じて適切な Binning を選択することが必要と考えられた。Hough 変換では Spherical Indexing と比較して KAM が著しく高くなった。これは、隣接する測定点間の方位差に Fig. 10 で示された測定誤差が上乘せられた値が KAM として与えられるためと考えられた。

Fig. 12 に示した KAM の平均値と Spherical Indexing に用いたマスターパターンの格子定数の誤差 ( $\Delta a$ ) の関係を Fig. 13 に示す。各 Binning で得られた KAM は  $\Delta a$  によらず一定であった。Fig. 9 に示す通り、Spherical Indexing で得られた結晶方位

はマスターパターンの格子定数によって変化していた。また、同一の結晶粒内では、パターンマッチングによって再現性良く同程度の Disorientation が生じていた。このことから、マスターパターンの格子定数が変化したとき、隣接する測定点では同一方向に結晶回転が生じたようにパターンマッチングによる指数付けがされたことで、測定点間の局所方位差を示す KAM には変化が見られなかったと推察された。

今回の供試材は溶体化まま材であるため、粒内の方位差は小さく、平均 KAM はゼロに限りなく近い値を取るはずである。つまり、ここで得られた平均 KAM が、Spherical Indexing の方位決定精度(角度分解能)に相当すると考えられる。Table 5 から見積もった通り、Binning が小さい方が角度分解能は高くなるため平均 KAM は小さくなった。一方で、Table 5 で見積もった値よりも平均 KAM は著しく小さかった。Table 5 からの見積りでは、方位精度は 1 ピクセルの 1 辺の長さに比例し、Binning が 1x1 であれば、8x8 の 8 倍程度の方位精度を持つと考えられたが、8x8 の平均 KAM は 1x1 の 1.5 倍程度であり、Binning が 8x8 でも十分な方位精度が得られることがわかった。

Spherical Indexing では、格子定数に依存するバンド幅だけではなく、格子定数に依存しないバンド同士の角度関係や晶帯軸の位置を含めたパターンマッチングによって指数付けが行われる。そのため、マスターパターンの格子定数やパターンの解像度に対してロバストに、正確に結晶方位を決定できる優れた手法であることが示された。つまり、合金化に伴う数%程度の格子定数の誤差であれば Spherical Indexing による

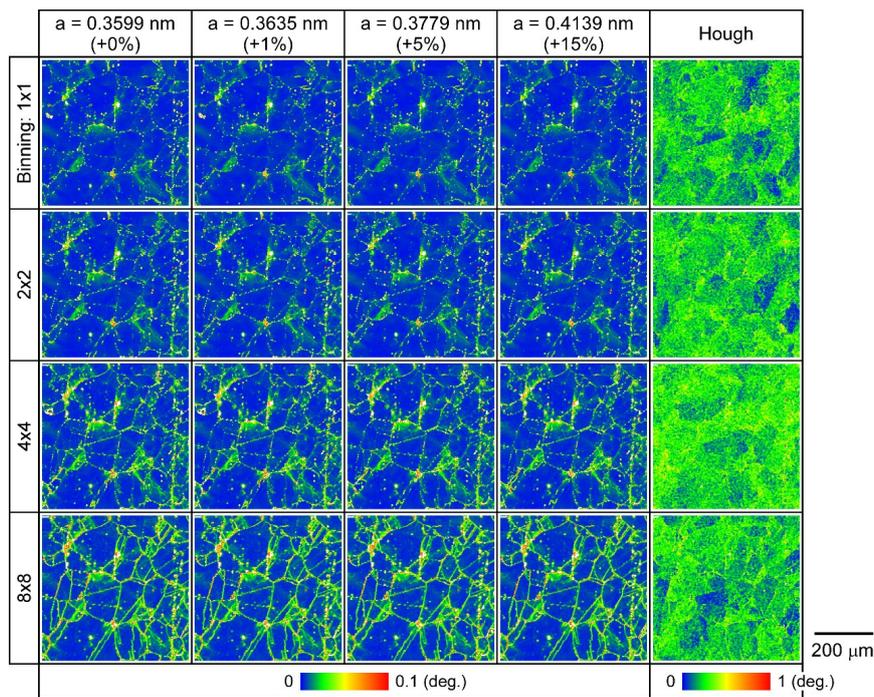


Fig. 12 Kernel average misorientation (KAM) maps obtained by the binning sizes of 1x1 to 8x8 by the Spherical Indexing with several lattice parameters of the master pattern and Hough indexing. (online color)

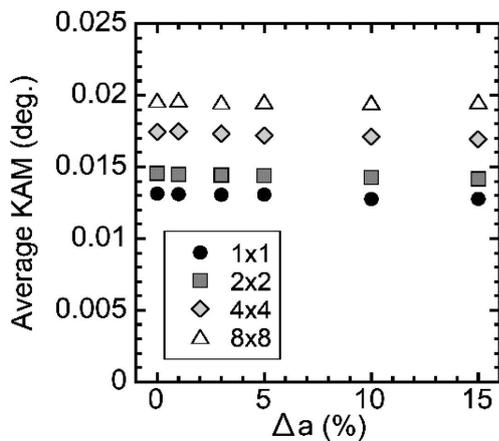


Fig. 13 Relationship between the deviation of lattice parameter of master pattern ( $\Delta a$ ) and average KAM.

指数付け精度にほとんど影響はなく、データベース上の純金属の格子定数を用いて作成したマスターパターンを使用しても問題ないと考えられた。

#### 4. 結 言

シミュレーションにより作成したマスターパターンとのパターンマッチングによる EBSD パターンの指数付け法 (Spherical Indexing) に及ぼすマスターパターンの格子定数および EBSD パターンの解像度の影響を調査した。

マスターパターンの格子定数の誤差が大きいほど、真の結晶方位からの誤差が大きくなると考えられた。したがって、

結晶粒間の方位差を正確に求めたい場合には格子定数を正確に測定しておく必要があると考えられた。

EBSD パターンの解像度が低い場合には、粒界近傍での KAM が高くなった。したがって、粒界近傍の微小な方位変化を KAM として評価する場合には EBSD パターンの解像度が高い方が望ましいと考えられた。

Spherical Indexing による方位決定精度は、マスターパターンの格子定数の誤差が大きい場合や EBSD パターンの解像度が低い場合でも、従来の Hough 変換を用いた手法より優れていた。これは、格子定数が変わっても晶帯軸の位置関係は変化しないことが理由と考えられ、Spherical Indexing が格子定数やパターン解像度に対してロバストな指数付け法であることが示された。

今回の検討は溶体化まま材を用いて行ったが、顕著に塑性変形した材料ではパターンが不鮮明になるため、変形材を用いた検証が今後の課題である。

XRD による格子定数の測定は(国研)物質・材料研究機構 技術開発・共用部門の廣戸孝信氏の支援により実施した。EBSD は(国研)物質・材料研究機構 技術開発・共用部門の諸永拓氏、原由佳氏、中村晶子氏の支援により実施された。

#### オープンアクセス

本論文は、CC BY-NC-ND ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed>) の下でライセンスされています。ライセンス条件(帰属表示, 非営利利用, 改変禁止)に従う限り、共有または利用することができます。

## 文 献

- [1] S. Suzuki: Features of recent EBSD and its future, *J. JILM* **72** (2022) 570-577.
- [2] N.C.K. Lassen, D.J. Jensen and K. Conradsen: Image Processing Procedures for Analysis of Electron Back Scattering Patterns, *Scanning Microscopy* **6** (1992) 115-121.
- [3] S.I. Wright and B.L. Adams: Automatic analysis of electron backscatter diffraction patterns, *Metall. Trans. A* **23** (1992) 759-767.
- [4] Q. Shi, D. Loinsard, Y. Li, Z. Chen, H. Wang and S. Roux: Accuracy assessment of crystal orientation indexations by EBSD, *Meas. Sci. Technol.* **35** (2024) 045030.
- [5] R. Yoda, M. Kamaya, H. Kimura, T. Ohtani and K. Fujiyama: Round Robin Test Using EBSD for Creep Damage Evaluation, *J. Soc. Mater. Sci., Japan* **66** (2017) 130-137.
- [6] K. Kubushiro, Y. Shioda and K. Nomura: Creep Degradation for Austenitic Stainless steel in KA-SUS304J1HTB, *J. Soc. Mater. Sci., Japan* **66** (2017) 179-184.
- [7] S.-S. Rui, Y.-B. Shang, Y.-N. Fan, Q.-N. Han, L.-S. Niu, H.-J. Shi, K. Hashimoto and N. Komai: EBSD analysis of creep deformation induced grain lattice distortion: A new method for creep damage evaluation of austenitic stainless steels, *Mater. Sci. Eng. A* **733** (2018) 329-337.
- [8] W.C. Lenthe, S. Singh and M. De Graef: A spherical harmonic transform approach to the indexing of electron back-scattered diffraction patterns, *Ultramicroscopy* **207** (2019) 112841.
- [9] R. Hielscher, F. Bartel and T.B. Britton: Gazing at crystal balls: Electron backscatter diffraction pattern analysis and cross correlation on the sphere, *Ultramicroscopy* **207** (2019) 112836.
- [10] KA-SUS 310J1 TB, The material specification in the Technical Regulation of Equipment for Thermal Power Plant, 2016.
- [11] NIMS Creep Data Sheet, Metallographic Atlas of Long-term Crept Materials, No. M-12, 2019.
- [12] A. Winkelmann, C. Trager-Cowan, F. Sweeney, A.P. Day and P. Parbrook: Many-beam dynamical simulation of electron backscatter diffraction patterns, *Ultramicroscopy* **107** (2007) 414-421.
- [13] P.G. Callahan and M. De Graef: Dynamical Electron Backscatter Diffraction Patterns. Part I: Pattern Simulations, *Microsc. Microanal.* **19** (2013) 1255-1265.
- [14] J.B. Nelson and D.P. Riley: An experimental investigation of extrapolation methods in the derivation of accurate unit-cell dimensions of crystals, *Proc. Phys. Soc.* **57** (1945) 160-177.
- [15] S. Suzuki: Principal of EBSD Method and Its Application to Microstructure Analysis of Materials, *Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging* **13** (2010) 469-474.
- [16] W. Hume-Rothery, G.W. Mabbott and K.M.C. Evans: The freezing points, melting points, and solid solubility limits of the alloys of silver and copper with the elements of the b sub-groups, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **233** (1934) 1-97.
- [17] S. Suzuki: *EBSD Tokuhon =OIM-wo Shiyo suruni atatte= B 4.00*, (TSL Solutions, 2021).