

# スーパーメタルの曲げ加工に関する結晶方位データベースの構築と評価

酒井 孝

## Construction and Evaluation of Database for Grained Materials with Bending

Takashi SAKAI

**Abstract:** The database constructed in this study enables us to input quantitative data related to crystallographic orientation to elucidate the properties of change of crystallographic orientation during bending of fine-grained materials. The obtained results are summarized as follows; (1) A crystal orientation tabulation program was produced. The crystallographic orientation distribution on the ND plane was computed quantitatively using Euler angle data acquired from SEM-EBSD analysis, so that quantitative data can be input into a database. (2) A devised algorithm was created, which can input combined data sets of the texture accumulation ratio and IPF figure of crystallographic orientation to three specific orientations of [001], [101], and [111], and the quantitative data of springback. (3) To date, 75 data of about 22.3 MB, including 37 data of pure copper, 25 data of pure aluminum, and 13 data of various steels, have been stored in the database. (4) The database proposed in this paper is useful for estimation of springback based on the stochastic analysis with Weibull distribution.

**Key Words:** Database, Bending, Springback, Crystallographic Orientation, Texture, SEM-EBSD Analysis, Cold Working, Grained Structure

(Received September 20, 2011)

## 1. 緒 言

強ひずみ加工を基としたスーパーメタル（微細結晶粒材）の創製プロジェクトが終了し、次にこのスーパーメタルを市場に普及させるために、(1) スーパーメタルのバルク材を創製する研究、(2) スーパーメタルの加工特性について調査する研究、(3) 既存のスーパーメタル創製法を複合して微細化工程の効率化を図る研究、などの次段階の研究活動が活発になってきている。このうち、(2) スーパーメタルの加工特性、について着目すると、切削加工によりスーパーメタルネジやシャフトなどを製作した例は報告されているものの、塑性加工による製品の製作例は全くない。このことは、スーパーメタル創製段階で材料内部に過大なひずみが導入されるので、従来材料と集合組織分布等の微視的特性が異なるために、高精度な塑性加工特性を予測および制御することが困難なことに起因している。

これまでに筆者らは、鉄鋼材料、非鉄金属の各種プレ

ス用金属材料を対象として、強ひずみ加工（主に強圧延）によるスーパーメタルの曲げ特性について調査した。また、SEM-EBSDやXRD解析により、曲げ部のND面の結晶方位解析を行い微細化過程と曲げ応力による結晶方位の回転について調べ、スーパーメタルの曲げ加工では従来の納入材と異なる集合組織の形成過程を明らかにした。

本報では、このスーパーメタルの曲げ加工におけるスプリングバック特性と結晶方位特性との相関についてデータベースを構築し、このデータベースを用いたスプリングバック特性の予測について提案する。すなわち、曲げ加工におけるスプリングバック特性、ND面曲げ部の結晶方位特性はともにばらつきを持つことから、これらを適切に定量化するために確率統計的手法を用いた定量解析と推定を行った。

## 2. 曲げ加工にともなう結晶方位の変化

SEM-EBSDによるND面曲げ部の解析例として、Fig. 1

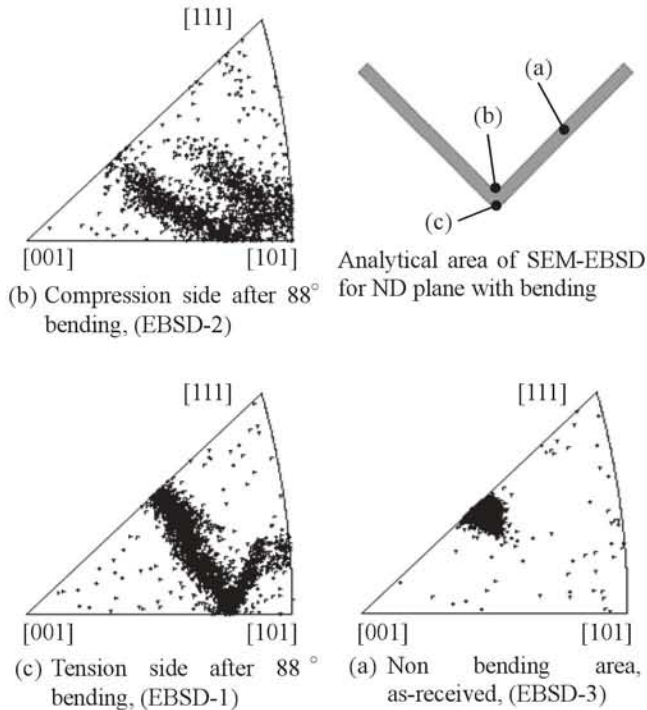


Fig. 1 Typical example of SEM-EBSD analysis, change of crystallographic orientation with bending (pure Cu single crystal [111], 88° bending).

に純Cu単結晶材(軸方位[111])を[110]方向に板厚が50%になるまで連続的に強圧延した材料を、室温大気中で曲げ加工した時の結晶方位特性(IPF(逆極点図))を示す。図(a)の非曲げ部(EBSD-3)の結晶方位観察では強圧延の影響でCopper textureが観察でき、後述のプログラムを応用することで $A_{[112]}=97.0\%$ の集積と算出できた。この材料をフリーベンドの状態まで88°まで曲げると、曲げ応力の影響で引張側表層部(EBSD-1)では[112]から[203]への結晶回転が起こった。また、圧縮側表層部(EBSD-2)では[101]への集積が見られた。他の材料に関する解析結果を含め、スーパーメタルの曲げ加工では、材料創製段階と曲げ加工段階の両方で結晶方位変化が起こり、ばらつきはあるもののそれらはともに結晶格子型および応力の種類ごとに定められる最終安定方位に集積することが明らかになった。

### 3. 解析方法とデータベースの構築手順

上記のSEM-EBSD解析により得られたオイラー角の数値データを、自作した結晶方位集計プログラムを用いてND面の結晶方位分布を定量的に算出した。このプログラムのユーザーインターフェイスをFig. 2に示す。この特長として、視覚的にわかりやすくIPFを表示するとともに、

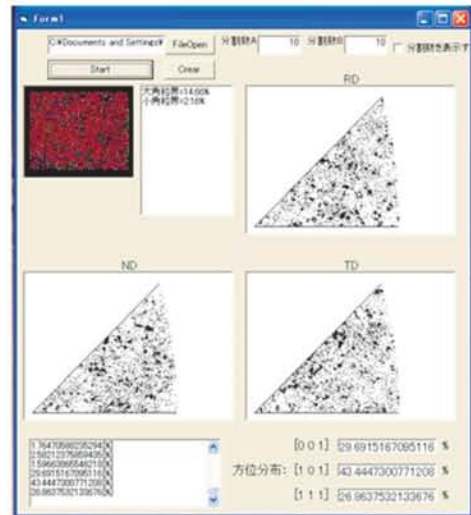


Fig. 2 User interface of proposed analytical software (calculation of distribution of crystallographic orientation, and large and small angle boundaries).

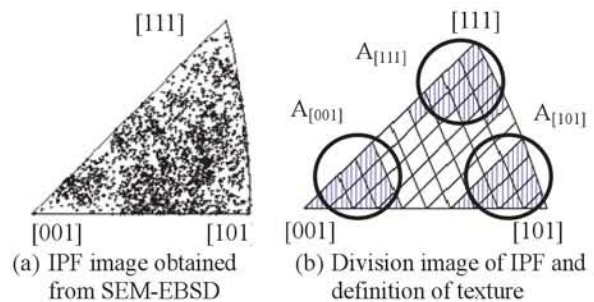


Fig. 3 Division image of IPF obtained from SEM-EBSD analysis, and definition of texture for typical direction of [111], [001] and [101].

右下のウィンドウにND面の結晶方位の集積割合が表示できる。また、隣接する各測定点から結晶方位の角度差を求め、 $\theta \geq 10^\circ$ を大角粒界、 $\theta < 10^\circ$ を小角粒界と定義して定量的に表示できるようにした。一般に、大角粒界が減少して小角粒界が増加することは、強ひずみ加工や後の二次加工による応力の影響で動的再結晶が起こり、再結晶粒が形成されたことを意味する。

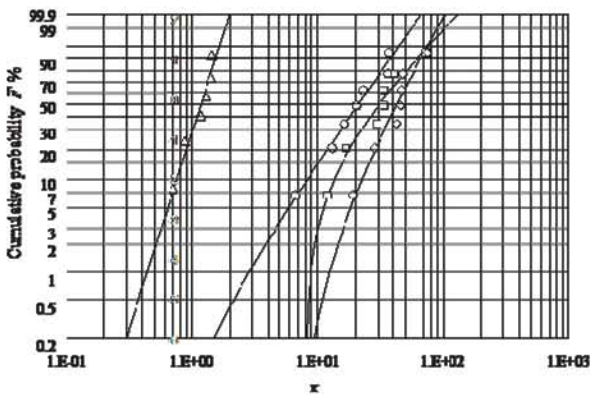
IPFの分割に関して、Fig. 3(b)に示すように半径方向、 $\theta$ 方向をそれぞれ10分割、合計55のエリアに分割した。そのうえで、各頂点の[111], [001], [101]に接近した10エリア分をそれぞれ $A_{[111]}$ ,  $A_{[001]}$ ,  $A_{[101]}$ として各方位への集積割合として百分率で表示した。将来的にこのアルゴリズムを変更することで、集合組織の高精度な表示に対応する細分化ができる。データベースにはこれら3方位への結晶方位の集積割合と、曲げ加工におけるスプリングバック量



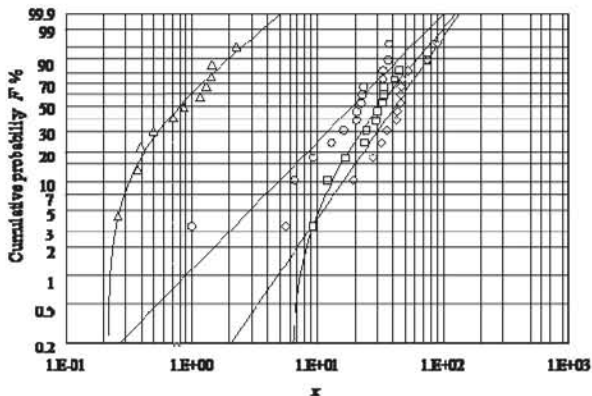
の定量データを組み合わせたデータ対を入力し蓄積した。現時点までに、データベースに75件の結晶方位データとスプリングバックデータのデータ対を入力した。

#### 4. データベースを援用した統計解析の例

データベースを援用した統計解析の一例として、Fig. 4に統計解析ソフトSTANADを用いて結晶方位データとスプリングバックデータを3母数ワイブル分布の累積分布関数 $F(x)$ で表示した例を示す。図(a), (b)はそれぞれ、(a)データベースの純Cu単結晶・多結晶のデータ、(b)全ての金属材料データ、に対する結果についてまとめたものである。図から得られたワイブル分布の各母数をTable 1にまとめた。スプリングバックの $F(x)$ の各母数と $88^\circ$ 曲げ後の3方位への集積割合の $F(x)$ 、および非曲げ部(EBSD-3)の $F(x)$ を相関付けて非曲げ部の結晶方位データからスプリングバック量の推定をしたところ、実験値と比較して大変良好な結果が得られた。



(a) Weibull distribution for 7 numerical data about pure Cu single- and poly-crystal.



(b) Weibull distribution for 14 numerical data about all materials.

Fig. 4 3-parameters Weibull distribution for springback degree data and crystallographic orientation about [111], [001] and [101].

Table 1 Numerical list of Weibull parameters obtained from STANAD program.

\* SB: Spring-back degree

|          |       | Shape parameter, $a$ | Scale parameter, $b$ | Location parameter, $c$ |
|----------|-------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Cu data  | [001] | 1.93                 | 24.4                 | 0.50                    |
|          | [101] | 1.53                 | 29.6                 | 7.80                    |
|          | [111] | 2.30                 | 41.7                 | 6.62                    |
|          | SB*   | 4.27                 | 1.26                 | 0.00                    |
| All data | [001] | 1.38                 | 24.5                 | 0.00                    |
|          | [101] | 1.47                 | 32.3                 | 5.92                    |
|          | [111] | 1.95                 | 49.9                 | 0.00                    |
|          | SB*   | 1.08                 | 0.81                 | 0.22                    |

#### 5. 結言

本研究で得られた内容を以下に示す。

- (1) 3母数ワイブル分布を利用した新たな統計解析手法を提案した。
- (2) 結晶方位データベースを援用して、非曲げ部の結晶方位データからSB量を推定したところ、実験値と比較して大変良好な整合性が得られた。