エピタキシーフリー三軸結晶配向技術としての磁場配向法
Magnetic alignment as “Epitaxy-free” triaxial crystal orientation technique

京都先端科学大学・工：　堀井滋
Faculty of Eng., Kyoto Univ. Adv. Sci.: S. Horii
Email: horii.shigeru@kuas.ac.jp

1. 磁場配向法について

機能性材料の高機能化や実用化に単結晶（3軸結晶配向制御）を必要とする物質は数多い。単結晶を得るには、通常エピタキシャル成長技術が用いられ、種結晶からの融液成長や高配向基材上の薄膜成長が該当する。このようなエピタキシャル成長技術に加えて、新しい3軸結晶配向法として、物質の3軸結晶磁気異方性を利用した回転変調磁場(MRF) による磁場配向[1]が存在する。磁場配向法は室温プロセス・非真空プロセスであること、遠隔力ゆえ高配向基材が不要となること、樹脂中のフィラーの配向など複合材料に適用できることなど、エピタキシャル成長とは異なる技術的特徴をもつ。

ここで、回転変調磁場による三軸結晶配向の原理について説明する。Fig. 1 に、MRF のうち間欠回転磁場[2,3]の概念図を示す。間欠回転磁場は磁場の静止・回転を繰り返すことで所望の磁場を発生させることができる。原理的には、静止時に生じる静止磁場に対して平行方向に第一磁化容易軸が配向し、回転磁場の垂直方向に磁化困難軸が同時に配向することで3軸結晶配向が実現する。ただし、回転磁場による磁化困難軸配向の成立条件として、磁場回転によって第一磁化容易軸の追随が起こらないような高速の回転磁場が印加されていることを満たす必要がある。所望の間欠回転磁場により、Fig. 1 において、第一磁化容易軸、第二磁化容易軸、磁化困難軸はそれぞれ α 面、β 面、γ 面に垂直に配向する。

2. 磁場配向条件および MRF 発生装置について

一軸性の磁気異方性（磁化容易軸と磁化困難軸の体積磁化率の差: $\Delta\chi$）をもつ物質について静磁場で磁化容易軸を配向させるための条件は以下のように表される。

$$\frac{VB^2}{2\mu_0}\Delta\chi > 1000k_BT \qquad (1)$$

右辺は熱擾乱エネルギー（k_BT）であり、この擾乱を上回るような配向エネルギー（左辺）を粒子に与えることで配向が実現する。配向エネルギーは、磁気異方性に比例する。さらに、印加磁場強度（B）の 2 乗に、粒子の体積（V）に比例することも重要である。なお、配向挙動がボルツマン統計に従うとすれば、式(1)の右辺の係数 1000 は、半値幅としての配向度が 5 度程度となる磁場配向条件[4]になる。定性的には、三軸磁場配向の場合、式(1)の概念を、(A) 第一と第二磁化容易軸の磁気異方性　と (B) 第二磁化容易軸と磁化困難軸の磁気異方性　の両者に適用し、それぞれに十分な磁場配向エネルギーを与えることで三軸磁場配向が実現する。

間欠回転磁場の発生のための 2 つの設備について紹介する。第 1 に、「超伝導電磁石＋試料回転機構」である。主な対象物質は異方性をもつ常磁性・反磁性物質であるため、磁化率の大きさが小さく必然的に $\Delta\chi$ の大きさも小さい。10 テスラ級の室温ボアを有する超伝導磁石はいわゆる非磁性物質の磁場配向に対応できる。ただし、重量物ゆえ、水平磁場中で試料を回転させで相対的な MRF を発生する。

Fig. 2 に連続製造プロセスに対応した MRF が発生できるリニア駆動型 MRF 発生装置の外観写真である。これが第 2 の設備である。MRF 発生方法の詳細については、他[5,6]に譲るが、磁束方位を制御した上部・下部の永久磁石配列からなる配列磁石を直線往復運動させることで、上部と下部の間に設置したシート状試料に MRF を印加できる。現状、試料の直線搬送装置は導入されていないが、シート状の長尺試料について連続的に MRF を印加し 3 軸結晶配向できる特長をもつ。

当日は、これらの磁場発生装置の詳細に加えて、3 軸結晶磁気異方性をもつ高温超伝導物質を例に三軸磁場配向の実際について紹介する。

謝辞 本研究は、 JST・研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP、 ステージ I)および科学研究費助成事業(17H03235)の助成を受けて実施された。

参考文献 [1] Kimura *et al.*, Langmuir 22, 3464 (2006). [2] Fukushima, Horii *et al.*, *Appl. Phys. Express*. **1**, 111701 (2008). [3] Yamaki, Horii *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 010107 (2012) [4] 堀井、粉体・粉末冶金 65, 634 (2018). [5] Horii *et al.*, *J. Cer. Soc. Jpn*. 126, 885 (2018). [6] 堀井、応用物理 89 (2020) 715.

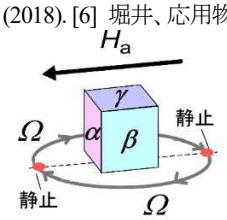

Fig. 1. Experimental configuration in an MRF.

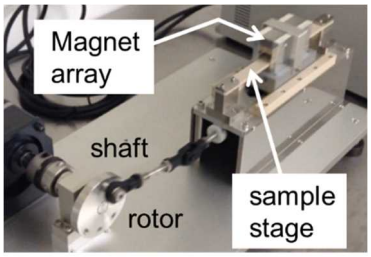

Fig. 2. Photo of the linear drive type MRF equipment.

© 2023年 応用物理学会