

高性能低透磁率コア用ナノ結晶軟磁性材料  
開発に関する研究

2004年 12月

長崎大学大学院  
生産科学研究科

柳井 武志

# 目 次

## 第1章 序論

1.1 はじめに	1
1.2 研究対象と意義	1
1.3 透磁率制御型磁気コア	4
1.4 磁気損失の低減法	6
1.4.1 磁化回転モードの利用	6
1.4.2 ナノ結晶材料	10
1.5 透磁率の制御法	13
1.6 新低透磁率軟磁性材料	15
1.6.1 一軸異方性の形成	15
1.6.2 クリープ誘導磁気異方性	16
1.7 本研究の目的	17
1.8 本研究の概要	18
参考文献	20

## 第2章 実験装置および実験方法

2.1 はじめに	22
2.2 試料の組成および形状	22
2.3 長尺ナノ結晶薄帯のトロイダルコア成形	25
2.4 直流磁気特性の測定	26
2.5 異方性エネルギー，異方性磁界および直流透磁率の算出	31
2.6 交流磁気特性の測定	33
2.6.1 コア状試料の交流磁気特性の測定	33
2.6.2 直流重畳特性の測定	35
2.7 高温磁気特性の測定	36
2.8 熱磁気特性の測定	37
2.9 走査型電子顕微鏡（SEM）による磁区観察	37
2.10 電気抵抗率の測定	40
2.11 飽和磁気ひずみ定数の測定	41
2.12 長手方向の伸び率の測定	42
2.13 ヤング率の測定	44
参考文献	45

### 第3章 結晶化過程と異方性誘導過程

3.1 はじめに	46
3.2 熱処理開始温度が異方性に与える影響	47
3.2.1 実験方法	47
3.2.2 熱磁気特性によるアモルファスの確認と キュリー温度および結晶化温度の評価	50
3.2.3 初期温度が異方性に与える影響	52
3.3 結晶化と異方性誘導の関係	65
3.3.1 実験方法	65
3.3.2 結晶化の進行と異方性誘導の関係	65
3.4 結晶化と異方性緩和の関係	73
3.4.1 実験方法	73
3.4.2 結晶度による異方性緩和特性の差異	73
3.5 まとめ	79
参考文献	80

### 第4章 熱処理法の改善

4.1 はじめに	81
4.1.1 ジュール加熱法のメリット	81
4.1.2 応力下連続焼鈍法のメリット	82
4.2 ジュール加熱法による異方性誘導	83
4.2.1 実験方法	83
4.2.2 異方性エネルギーの電流密度依存性	85
4.2.3 異方性エネルギーの熱処理時間（通電時間）依存性	90
4.2.4 異方性エネルギーの印加張力依存性	91
4.2.5 超短時間ジュール加熱熱処理による異方性誘導	92
4.2.6 昇温率が磁気特性に与える影響	95
4.2.7 長尺薄帯への異方性付与	99
4.3 応力下連続焼鈍法による異方性誘導	100
4.3.1 実験方法	100
4.3.2 試料の長手方向伸び率	101
4.3.3 異方性エネルギーの印加張力依存性	103
4.3.4 異方性エネルギーの移動速度依存性	105
4.3.5 長尺薄帯への異方性付与	107
4.3.6 異方性の安定化	108
4.4 まとめ	113

参考文献	115
<b>第5章 クリープ誘導型低透磁率コアの磁気特性</b>	
5.1 はじめに	116
5.2 コア径が磁気特性に与える影響	116
5.2.1 コア径が磁気損失に与える影響	116
5.2.2 限界コア径	119
5.3 最適熱処理を施し作製したコアの磁気特性	122
5.3.1 透磁率の周波数依存性	122
5.3.2 磁気損失の周波数依存性	124
5.3.3 直流重畳特性	126
5.4 コアの小型化の可能性	131
5.5 コアの高周特性	133
5.5.1 飽和磁化, 異方性エネルギーの温度依存性	133
5.5.2 透磁率および磁気損失の温度依存性	135
5.6 まとめ	139
参考文献	140
<b>第6章 結論</b>	
6.1 本研究の結論	141
6.2 今後の研究課題および展望	142
謝辞	150