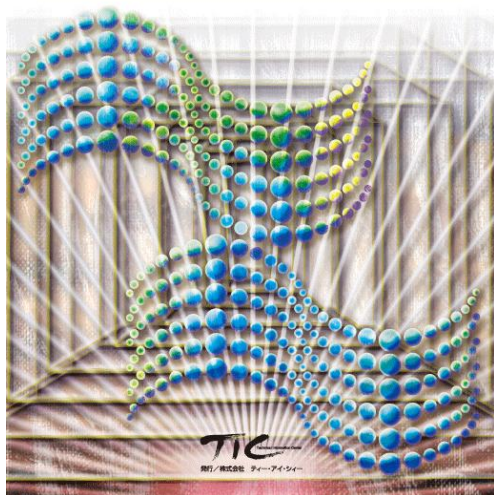


## 注目の誘電体セラミックス材料(1) 応用に根ざした非鉛圧電材料の設計

### 注目の誘電体セラミックス材料(1)

① シリーズ「ナノからテラへ」

# 応用に根ざした 非鉛圧電材料の設計



本体定価 30,000 円 (税別) 本文 880 頁  
2014 年 3 月 10 日 第 1 版第 1 刷発行

チタン・ジルコン酸鉛 (PZT) の主成分である鉛の毒性のため、鉛を用いない非鉛系圧電体の研究が、近年非常に活発になっています。

企業では万が一の鉛使用規制に備えるため、大学や公的研究機関では万が一の新材料発見の夢にかけるため、非鉛系圧電材料の探索に取り組んでいます。これらの研究・開発の過程で新非鉛系材料の探索は基より各プロセスの改善、使用目的に応じた材料設計、新しいナノ構造の提案など目覚ましい研究開発の展開が見られ材料技術の粋が集積されていると云っても過言ではありません。

そこで、前版の「注目の誘電体セラミックス材料」をベースにこの 10 年のマテリアルインテグレーション誌に掲載された関連記事を編集しなおし、非鉛系圧電材料を中心とした増補改訂版を発行することにしました。この分野での調査、企画、研究開発、製造、応用などを目指される方々に活用頂ければ幸いです。

### 執筆者一覧 (50 音順) 肩書は執筆当時

Gisele Foulon  
Shou-Qi WANG

明渡 純

安達 正利

阿部 洋

飯島 高志

越智 篤

一ノ瀬 昇

稲垣 友美

稲葉 秀弘

井上 真司

井上 武志

猪 義博

上田 真二郎

宇田 聡

打越 哲郎

内野 研二

王 瑞平

太田 一徳

大野 留次

大橋 優喜

Silicon Light Machines

三菱マテリアル(株) 電子デバイス開発センター

(独) 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ

富山県立大学 工学部 教授

(株) トーキョー 商品開発研究所

(独) 産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター

日本電気 (株) 機能材料研究所

早稲田大学理工学部物質開発工学科 教授

名古屋工業大学大学院 工学研究科 大学院生 日本学術振興会 特別研究員

(株) 富士セラミックス 生産部生産 2 課

京セラ (株) 中央研究所

日本電気 (株) 機能材料研究所

(株) トーキョー 商品開発研究所 首席技師長

松下電子部品 (株) 開発技術センター カーエレクトロニクス技術研究所 主任技師

東北大学 金属材料研究所 教授

物質・材料研究機構 先端材料プロセスユニット

ペンシルバニア州立大学工学部 教授

(独) 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 酸化物デバイスグループ

(独) 産業技術総合研究所セラミックス研究部門機能複合粉体研究グループ

(株) トーキョー 取締役 商品開発研究所長

(独) 産業技術総合研究所セラミックス研究部門機能複合粉体研究グループ

岡 定人	(株) タムラ製作所 電子ユニット事業部
荻浦 美嗣	(株) 村田製作所 センサモジュール事業推進部
奥山 雅則	大阪大学基礎工学部電気工学科 教授
柿本 健一	名古屋工業大学大学院 工学研究科 准教授
掛本 博文	東京工業大学大学院理工学研究科
加藤 一実	(独) 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 テーラードリキッド集積研究グループ 研究グループ長
上羽 貞行	東京工業大学精密工学研究所
唐木 智明	富山県立大学 工学部 准教授
川上 省二	(独) 産業技術総合研究所セラミックス研究部門機能複合粉体研究グループ
川田 慎一郎	(株) 村田製作所 技術・事業開発本部 材料開発統括部 材料1部
岸 輝雄	東京大学先端科学技術研究センター 教授
北中 佑樹	東京大学先端科学技術研究センター
北村 健二	物質・材料研究機構 光学単結晶グループ
木村 敏夫	慶應義塾大学理工学研究科 総合デザイン工学専攻 教授
木村 雅彦	(株) 村田製作所 技術・事業開発本部 材料開発統括部 材料1部
宮山 勝	東京大学先端科学技術研究センター
楠本 慶二	(独) 産業技術総合研究所セラミックス研究部門機能複合粉体研究グループ
工藤 すばる	石巻専修大学理工学部電子材料工学科 助手
熊田 明生	ピエゾ・テック (株) 代表取締役
栗村 直	物質・材料研究機構 光学単結晶グループ
黒澤 実	東京大学工学部精密機械工学科
神野 伊策	神戸大学工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 准教授
神山 一司	京セラ (株) 中央研究所
小林 剛史	(株) 東芝 研究開発センター, 給電・材料デバイスラボラトリー
坂井 雄一	富山県工業技術センター 機械電子研究所 電子技術課 研究員
坂本 渉	名古屋大学 エコトピア科学研究所 ナノマテリアル科学研究部門
佐々木 康弘	日本電気 (株) 機能材料研究所
目 義雄	物質・材料研究機構 先端材料プロセスユニット
塩崎 雄	京都大学工学部電子工学科 助教授
地頭所 典行	松下電子部品 (株) 開発技術センター カーエレクトロニクス技術研究所 主担当
柴田 憲治	日立電線 (株) 技術本部 技術研究所 先端電子材料研究部
志波 光晴	東京大学先端科学技術研究センター 客員研究員
島村 清史	東北大学 金属材料研究所
白露 幸祐	(株) 村田製作所
末永 和史	日立電線 (株) 技術本部 技術研究所 先端電子材料研究部
菅原 澄夫	石巻専修大学理工学部電子材料工学科 助教授
鈴木 達	物質・材料研究機構 先端材料プロセスユニット
高尾 泰正	(独) 産業技術総合研究所セラミックス研究部門機能複合粉体研究グループ
高橋 貞行	早稲田大学理工学総合研究センター 客員教授
高橋 弘文	(株) 富士セラミックス 開発部 部長
竹内 友成	産業技術総合研究所ユビキタスエネルギー研究部門 主任研究員
竹川 俊二	物質・材料研究機構 光学単結晶グループ
武田 博明	東京工業大学大学院理工学研究科
竹中 正	東京理科大学理工学部 電気電子情報工学科 教授
谷 俊彦	(株) 豊田中央研究所 無機材料研究室 主任研究員
土信田 豊	太陽誘電 (株)
鶴見 敬章	東京工業大学 大学院理工学研究科 材料工学専攻 教授
董 敦灼	本多電子 (株)
鍋田 正雄	SPS シンテックス (株) 専務取締役 開発センター 所長
砥綿 篤哉	(独) 産業技術総合研究所セラミックス研究部門機能複合粉体研究グループ
中里 匡志	(株) 康井精機 営業技術部
永田 肇	東京理科大学理工学部
中村 優	物質・材料研究機構 光学単結晶グループ
西戸 守仁	富士チタン工業 (株) 電子材料事業部 取締役事業部長
野口 祐二	東京大学先端科学技術研究センター
野本 明	日立電線 (株) 技術本部 技術研究所 先端電子材料研究部
橋口 裕作	(株) タムラ製作所 電子ユニット事業部
馬場 創	(独) 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ
浜川 圭弘	大阪大学基礎工学部電気工学科 教授
浜口 佑樹	本多電子 (株)
速水 浩平	(株) 音力発電 代表取締役, 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
原田 耕一	(株) 東芝 研究開発センター, 給電・材料デバイスラボラトリー
阪東 寛	(独) 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 酸化物デバイスグループ
東 正樹	東京工業大学応用セラミックス研究所

福島 英冲	(株)豊田中央研究所 主任研究員
福田 承生	東北大学 金属材料研究所
二口 友昭	富山県工業技術センター 中央研究所 評価技術課 課長
布田 良明	(株)トーキン 商品開発研究所第2研究部 課長
保科 拓也	東京工業大学大学院理工学研究科
堀川 勝弘	(株)村田製作所
堀切 文正	日立電線 (株) 技術本部 技術研究所 先端電子材料研究部
舞田 雄一	本多電子 (株)
巻野 勇喜雄	大阪大学接合科学研究所
松堂 人士	名古屋工業大学大学院 工学研究科 大学院生 日本学術振興会 特別研究員
松村 禎夫	(株)東芝 ディスプレイ, 部品材料社 材料部品技術部 参与
三宅 正司	近畿大学リエゾンセンター
三島 友義	日立電線 (株) 技術本部 技術研究所 先端電子材料研究部
三輪 恭也	(株)村田製作所 技術・事業開発本部
村上 慎	京セラ (株) 中央研究所
森 正和	龍谷大学 理工学部 機械システム工学科 助教
山下 洋八	(株)東芝 研究開発センター 研究主幹
山本 孝	防衛大学校電気工学教室 助教授
山本 満	日本電気 (株) 機能材料研究所
山森 春男	本多電子 (株)
李 恩竹	東京工業大学大学院理工学研究科
和田 智志	山梨大学大学院 院医学工学総合研究部工学領域物質工学系
渡辺 和俊	日立電線 (株) 技術本部 技術研究所 先端電子材料研究部

## 目 次

### 第1部 要素技術の新展開

#### 第1章 総論

##### 第1節 誘電体セラミックス総論

- 1 絶縁体材料
- 2 キャパシタ材料
- 3 マイクロ波誘電体材料
- 4 圧電体材料
- 5 焦電体材料
- 6 強誘電体材料
- 7 光用誘電体

##### 第2節 圧電・焦電セラミックスの新しい動き

- 1 はじめに
- 2 パワーデバイス用材料の動き
- 3 センサ用材料の動き
- 4 各研究機関における活動状況
- 5 おわりに

##### 第3節 非鉛系圧電材料の問題と将来

- 1 はじめに
- 2 何故、鉛が必要なのか？
- 3 ドメインの寄与と圧電性の評価
- 4 ビスマス化合物
- 5 アルカリニオブ酸系化合物
- 6 おわりに

##### 第4節 非鉛系圧電材料の応用分野と将来展望

#### 第2章 紛体合成

##### 第1節 新しい合成法と特性評価

- 1 アルコキシド法, 礬酸法, 部分化学法
- 2 誘電・圧電特性の粒径依存性
- 3 部分化学法

##### 第2節 シュウ酸法によるチタン酸バリウムのナノパウダー

- 1 はじめに
- 2 シュウ酸バリウムチタニルの合成
- 3 シュウ酸バリウムチタニルの熱分解によるチタン酸バリウムの合成

4 微粒子化の課題

5 おわりに

### 第3節 チタン酸バリウム微粒子の誘電特性におけるサイズ効果

1 はじめに

2 BaTiO<sub>3</sub> 微粒子の誘電特性の粒子サイズ依存性

3 BaTiO<sub>3</sub> 微粒子における粒子複合構造

4 おわりに

## 第3章 単結晶

### 第1節 圧電単結晶材料と応用の研究動向

1 はじめに

2 リラクサ系の圧電単結晶の特徴

3 リラクサ系の圧電単結晶の育成

3.1 フラックス法による結晶育成

3.2 ブリッジマン法による結晶育成

3.3 TSSG 法による結晶育成

3.4 SSG 法による結晶育成

3.5 TGG 法による結晶育成

4 新しいリラクサ系材料の探索

5 応用

6 おわりに

### 第2節 リラクサ系圧電単結晶とその応用

1 はじめに

2 リラクサ PT 系圧電単結晶材料

3 なぜリラクサ系単結晶か

4 超音波プローブへの適用

5 PZNT 単結晶の育成

6 超音波プローブ特性の向上

7 その他の単結晶動向

8 まとめ

### 第3節 PyroFree Lithium Tantalate (LiTaO<sub>3</sub>) for Surface Acoustic Waves Applications

1 Introduction

2 State of the Art and competitive technologies

3 PyroFree processing

4 Results

5 Summary of properties

6 Conclusion

### 第4節 SAW デバイス用 LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> 結晶

1 はじめに

2 各種 SAW 用単結晶基板材料

3 大口径ウェーハ製造技術動向

4 SAW 用としてのウェーハ品質

5 SAW 用単結晶基板の今後の動向

### 第5節 ランガサイト——新しい多目的圧電基板結晶

1 はじめに

2 Y54 度方位 4 インチランガサイト単結晶の育成

3 ランガサイト融液の非コングルーエント性と最適融液組成について

4 引き上げ法による Y54 度方位育成結晶の評価

5 ブリッジマン法による X 軸方位 2016101610 結晶の育成

6 まとめ

### 第6節 移動体通信用ランガサイト系結晶

1 はじめに

2 各種圧電単結晶の比較

3 LNG 単結晶育成

4 SAW 伝搬特性

5 フィルタの試作評価

6 まとめ

### 第7節 SLN・SLT

1 SLN・SLT の開発背景

- 2 SLN, SLT 育成法
- 3 SLN, SLT の組成
- 4 特性の不定比組成依存性
- 5 波長変換素子への応用
- 6 まとめ

## 第4章 ナノクリスタル

### 第1節 溶液内結晶化学に基づくナノクリスタルのボトムアップ技術

- 1 はじめに
- 2 ソノケミカル手法を用いたチタン酸バリウムナノクリスタルの低温合成と「非伝統的」結晶成長（集合）挙動
- 3 液液界面を利用して合成した酸化セリウムナノキューブの2次元配列制御
- 4 まとめと展望

### 第2節 溶液化学を利用した誘電体単結晶ナノキューブの合成と集積

- 1 はじめに
- 2 ペロブスカイトナノキューブ単結晶の合成
  - 2.1 水溶性チタン錯体の反応制御による酸素八面体ネットワーク構造の形成
  - 2.2 オレイン酸の性質を利用したキューブの形成
- 3 単結晶ナノキューブの自己集積化と微小配列構造の性質
- 4 まとめと展望

## 第5章 成膜技術

### 第1節 化学溶液法を用いたジルコン酸チタン酸鉛厚膜の作製とその圧電特性評価

- 1 はじめに
- 2 化学溶液法を用いたPZT膜の作製
- 3 PZT膜の微細加工
- 4 PZT膜の圧電特性評価
  - 4.1 微小変位測定による圧電特性評価
  - 4.2 電気的インピーダンス測定による圧電特性評価
- 5 まとめ

### 第2節 常温衝撃固化現象とエアロゾルデポジション技術

- 1 まえがき
- 2 エアロゾルデポジション技術の特徴
  - 2.1 装置構成
  - 2.2 常温衝撃固化現象によるセラミックスコーティング
  - 2.3 常温衝撃固化された成膜体の微細組織
  - 2.4 基板加熱の影響
- 3 常温衝撃固化と成膜メカニズムに関する検討
  - 3.1 粒子衝突速度の測定
  - 3.2 粒子飛行, 基板衝突のシミュレーション
  - 3.3 緻密膜形成の基本メカニズム
- 4 セラミックス厚膜の微細パターンニング
- 5 従来薄膜プロセスとの比較
- 6 膜の電気特性と熱処理による特性回復
- 7 最近の研究動向
  - 7.1 類似コーティング技術の動向
  - 7.2 レーザー照射援用による膜特性の改善
  - 7.3 メタルベース圧電厚膜アクチュエータ
  - 7.4 AD法によるオンデマンド製造
- 8 将来展望

### 第3節 PZT エアロゾル堆積膜の構造変化に及ぼすミリ波ポストアニール効果

- 1 緒言
- 2 実験方法
- 3 結果と考察
- 4 まとめ

### 第4節 AD法におけるプラズマ援用効果

- 1 はじめに
- 2 実験方法
  - 2.1 プラズマ援用AD成膜法のシステム
  - 2.2 誘導結合プラズマ援用AD法によるPZT膜の形成

- 3 実験結果
  - 3.1 高速イオンビームおよび直流プラズマ援用 AD 成膜法による PZT の形成
  - 3.2 誘導結合型プラズマ援用 AD 法による PZT の形成

- 4 まとめ

#### 第5節 基板の熱ダメージを抑えた圧電膜のレーザーアニール

- 1 はじめに
- 2 学会における圧電膜の研究状況
- 3 エアロゾルデポジション法
- 4 エネルギー援用の必要性
- 5 レーザーを用いたエネルギー援用の効果
- 6 レーザーアニールした PZT 膜/ステンレス基板の特徴
- 7 まとめ

#### 第6節 スパッタ法による (K, Na)NbO 鉛フリー圧電薄膜の開発

- 1 はじめに
- 2 スパッタ法で形成した KNN 薄膜の諸物性
- 3 KNN 薄膜の配向性制御による圧電特性の向上
- 4 KNN 薄膜の残留応力制御による圧電特性の向上
  - 4.1 残留応力と圧電特性の関係
  - 4.2 KNN 薄膜の結晶格子歪み解析
  - 4.3 結晶格子歪み緩和による圧電特性向上
- 5 (K, Na)NbO 圧電薄膜の微細加工特性
- 6 まとめと今後の展開

#### 第7節 スクリーン印刷法による非鉛系強誘電体厚膜の作製と応用

- 1 はじめに
- 2 BaTiO 系強誘電体厚膜のコンデンサ応用
- 3 BaTiO 系強誘電体厚膜のアクチュエータ応用
- 4 BiO 系強誘電体厚膜のセンサ応用
- 5 おわりに

#### 第8節 インクジェット法によるチタン酸バリウム厚膜の作製

- 1 はじめに
- 2 インクジェット技術
  - 2.1 インクジェット技術の特徴
  - 2.2 各種インクジェット方式
- 3 水系インクを用いた BaTiO<sub>3</sub> 厚膜の作製
  - 3.1 水系インクの作製と飛翔形状の観察
  - 3.2 パターン印刷と基板の処理
  - 3.3 厚膜の作製
- 4 おわりに

#### 第9節 次世代シート成形技術の動向スロットダイ及びマイクログラビア工法

- 1 はじめに
- 2 スロットダイ工法
  - 2.1 スロットダイ
  - 2.2 オフ・ロールとオン・ロール方式
  - 2.3 リップの形状
  - 2.4 成膜速度と粘度
  - 2.5 薄膜成形の条件
- 3 マイクログラビア工法
  - 3.1 装置の概要
  - 3.2 マイクログラビア方式の特徴
  - 3.3 塗工面の安定性
  - 3.4 塗工面の平滑性
  - 3.5 塗工膜厚の調整
- 4 おわりに

### 第6章 焼結法

#### 第1節 二段階焼結法で作製されたチタン酸バリウム圧電セラミックス

- 1 はじめに
- 2 二段階焼結
- 3 圧電特性

- 4 ポアソン比測定
  - 5 微細構造
  - 6 おわりに
- 第2節 マイクロ波プロセスの基礎、応用と世の中の動向**

- 1 はじめに
- 2 材料の基礎特性
  - 2.1 マイクロ波加熱の原理、特徴
  - 2.2 材料の誘電特性とマイクロ波加熱性
  - 2.3 加熱室内の電磁界分布
- 3 将来の自動車への応用
  - 3.1 セラミックスの焼成技術
  - 3.2 セラミックスの超高速加熱法の開発
  - 3.3 エタノール改質による新規な水素生成法
- 4 世の中の動向
- 5 おわりに

**第3節 マイクロ波焼結によるチタン酸バリウムの高性能化**

- 1 はじめに
- 2 非鉛系圧電材料の高性能化に関する手法
  - 2.1 圧電特性とドメインの関係
  - 2.2 マイクロ波焼結技術
- 3 マイクロ波焼結を利用して作製したチタン酸バリウムの特性
  - 3.1 実験試料の作製
  - 3.2 圧電特性に関する評価条件及び結果
  - 3.3 圧電特性と誘電率の関係
- 4 おわりに

**第4節 新しい焼結技術—放電プラズマ焼結 (SPS) 法**

- 1 はじめに
- 2 SPS 技術の最近の動向と普及状況
- 3 放電プラズマ焼結 (SPS) 法の原理と特徴
  - 3.1 SPS 法の加工原理
  - 3.2 SPS 装置の基本構成
- 4 SPS 法の応用分野
  - 4.1 主な応用分野
  - 4.2 先進セラミックス分野への応用
  - 4.3 複合酸化物 BaTiO<sub>3</sub>(チタン酸バリウム) 系材料の高機能化
  - 4.4 プラスト装置用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (アルミナ) セラミックスノズルへの応用例
  - 4.5 SiC 炭化硅素の SPS 焼結体
  - 4.6 WC 炭化タングステン SPS 焼結体の非球面ガラスレンズ金型への応用
  - 4.7 傾斜機能材料 (FGM: Functionally Graded Materials) の合成
  - 4.8 スパッタリングターゲット材料製造への応用
- 5 おわりに

**第5節 SPS による誘電体材料の創製**

- 1 はじめに
- 2 粒径制御による誘電特性制御
- 3 還元領域を利用した電気特性制御
- 4 複数成分の複合による誘電特性制御
- 5 その他

**第 II 部 非鉛系圧電材料の高機能化**

**第7章 非鉛系圧電材料の探索**

**第1節 環境に優しい非鉛系圧電セラミックス**

- 1 代表的な非鉛系圧電材料
- 2 ペロブスカイト構造非鉛圧電材料
  - 2.1 BaTiO<sub>3</sub> 系
  - 2.2 KNbO<sub>3</sub>-NaNbO<sub>3</sub>-LiNbO<sub>3</sub> 系
  - 2.3 (BiNa)TiO<sub>3</sub> 系
    - 2.3.1 (BiNa)<sub>x</sub>BaxTiO [BNBT-100x]系
    - 2.3.2 ((1-x)(BiNa)TiO<sub>3</sub>-xNaNbO<sub>3</sub>)系
    - 2.3.3 (BiNa)TiO<sub>3</sub>-KNbO<sub>3</sub>-1/2(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)系- および (BiNa)TiO<sub>3</sub>-BaTiO<sub>3</sub>-BiFeO<sub>3</sub>系 -

- 3 タングステン・ブロンズ型強誘電体セラミックス
- 4 ビスマス層状構造強誘電体系と粒子配向型圧電セラミックス
  - 4.1 ビスマス層状構造強誘電体 (BLSF)
  - 4.2 粒子配向型ビスマス層状構造強誘電体セラミックス
- 5 おわりに

## 第2節 非鉛系圧電セラミックスの研究開発状況とその課題

- 1 はじめに
- 2 ペロブスカイト型非鉛強誘電体セラミックス
  - 2.1 BaTiO<sub>3</sub> [BT] 系
  - 2.2 KNbO<sub>3</sub>-NaNbO<sub>3</sub>-LiNbO<sub>3</sub> [KN-NN-LN] 系
  - 2.3 KNbO<sub>3</sub> [KN] 系
  - 2.4 (Bi Na)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub> [BNT]
  - 2.5 (Bi Na)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub>-(Bi K)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub>-BaTiO<sub>3</sub> [BNT-BKT-BT] 三成分系
  - 2.6 (Bi Na)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub>-(Bi Li)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub>-(Bi K)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub> [BNT-BLT-BKT] 3成分系
  - 2.7 (Bi K)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub> [BKT] 系
- 3 ビスマス層状構造強誘電体 (BLSF) 系
  - 3.1 ビスマス層状構造強誘電体 (BLSF) と粒子配向型圧電セラミックス
  - 3.2 Bi<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub> (BIT) 系
  - 3.3 (Bi, Nd)<sub>1-x/12</sub>(Ti, V)<sub>2</sub>O<sub>7</sub> [BNTV-(x, y)] 系
  - 3.4 Sr<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>TiTaO<sub>7</sub> [SBTT2(x)] (1<x<2) 系
  - 3.5 (Sr, Ca)<sub>2</sub>BiTiO<sub>7</sub> (SCBT) 系
  - 3.6 BLSF 系の機械的品質係数 Q<sub>m</sub>
- 4 おわりに

## 第3節 (Bi, Na)<sub>2</sub>TiO<sub>7</sub>-BaTiO<sub>3</sub>-SrTiO<sub>3</sub> 系無鉛圧電セラミック材料の開発

- 1 はじめに
- 2 代表的な無鉛圧電セラミック材料
  - 2.1 ペロブスカイト型強誘電体
  - 2.2 タングステン・ブロンズ型強誘電体
  - 2.3 ビスマス層状構造型強誘電体
- 3 産業技術総合研究所が開発した BNT-BT-ST 系無鉛圧電セラミック材料
- 4 おわりに

## 第4節 (Na, K)NbO<sub>3</sub> 系固溶体の相転移と圧電特性

- 1 はじめに
- 2 Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> について
- 3 (Na, K)NbO<sub>3</sub> 系について
- 4 (Na, K)NbO<sub>3</sub> 系の結晶構造制御
  - 4.1 ニオブ系における正方晶の形成
  - 4.2 ニオブ系における菱面晶の形成
  - 4.3 比較
- 5 ニオブ系における MPB の形成
- 6 終わりに

## 第5節 ニオブ系非鉛圧電体の現状と今後の展開

- 1 はじめに
- 2 キレート錯体原料を利用した安定製法化
- 3 90° ドメインと斜方晶ドメインの役割
- 4 イオン欠損と電気物性
- 5 おわりに

## 第6節 非鉛ニオブ酸塩系圧電体セラミックス薄膜

- 1 はじめに
- 2 非鉛系圧電体セラミックス材料とその薄膜化
  - 2.1 様々な非鉛圧電セラミックス材料
  - 2.2 圧電セラミックスの薄膜化
  - 2.3 圧電体セラミックス薄膜の応用例
  - 2.4 薄膜における電界により誘起された変位の測定
  - 2.5 非鉛系圧電体セラミックス薄膜の圧電特性
  - 2.6 非鉛系圧電材料の特性改善に関するアプローチ
- 3 化学溶液プロセスにより作製したニオブ酸塩系圧電体薄膜
  - 3.1 非鉛圧電体 (K, Na)NbO<sub>3</sub> 薄膜作製のための前駆体コーティング溶液の調製と評価
  - 3.2 ペロブスカイト (K, Na)NbO<sub>3</sub> 薄膜の Si 系基板上への作製



- 3.3 (K, Na)NbO<sub>3</sub> 薄膜の電気的特性
- 3.4 (K, Na)NbO<sub>3</sub> 薄膜の配向制御による高機能化
- 3.5 (K, Na)NbO<sub>3</sub> 薄膜への Mn ドープによる強誘電特性向上

#### 4 まとめ

### 第7節 菱面体晶—正方晶固溶体 BiFeO<sub>3</sub>-BiCoO<sub>3</sub>

- 1 はじめに
- 2 巨大正方晶歪みをもつ BiCoO<sub>3</sub>
- 3 BiFeO<sub>3</sub>-BiCoO<sub>3</sub> の結晶構造変化
- 4 BiFeO<sub>3</sub>-BiCoO<sub>3</sub> 薄膜における圧電定数の増大
- 5 おわりに

### 第8節 (Bi, Na)TiO<sub>3</sub> 系無鉛圧電セラミックスの実用化及び課題

- 1 はじめに
- 2 実験方法
- 3 結果及び考察
  - 3.1 圧電セラミックス素子の特性
  - 3.2 BLT の特性
  - 3.3 超音波洗浄機 の特性
  - 3.4 今後の課題
- 4 まとめ

## 第8章 ドメイン構造制御

### 第1節 強誘電体結晶の異方性を利用したエンジニアード・ドメイン構造

- 1 はじめに
- 2 エンジニアード・ドメイン構造
- 3 エンジニアード・ドメイン構造の圧電特性への寄与
- 4 おわりに

### 第2節 ドメインエンジニアリングによる非鉛系圧電材料の特性向上

- 1 はじめに
- 2 ドメインエンジニアリング
- 3 エンジニアード・ドメイン構造誘起巨大圧電特性
- 4 ドメイン壁領域からの巨大圧電特性の発現
- 5 ドメイン壁エンジニアリングによる到達点
- 6 おわりに

### 第3節 ドメインエンジニアリングによる非鉛系圧電材料開発の最新

- 1 緒言
- 2 ドメインエンジニアリング概論
- 3 圧電特性におけるエンジニアード・ドメイン構造の効果
- 4 非 180° ドメイン壁領域における圧電特性への寄与
- 5 非 180° ドメイン壁密度と圧電特性との関係
- 6 BT 配向セラミックスにおけるドメインエンジニアリングへの挑戦
- 7 結言

### 第4節 人工 MPB エンジニアリングを用いた新規非鉛系圧電材料の提案

- 1 はじめに
- 2 MPB 構造における圧電特性向上機構
- 3 人工 MPB 構造創生の概念
- 4 人工 MPB 構造導入の実施
- 5 人工 MPB 構造導入による誘電・圧電特性
- 6 おわりに

## 第9章 配向制御

### 第1節 RTGG プロセスで設計する配向圧電セラミックス

- 1 はじめに
- 2 圧電セラミックスへの結晶配向付与の要請
- 3 RTGG 前史：結晶配向セラミックスの作製法
- 4 RTGG 法による圧電セラミックスの作製
- 5 配向度と緻密化に影響を与える因子
  - 5.1 配向度
  - 5.2 緻密化挙動
- 6 まとめ

## 第2節 テンプレート粒成長法による圧電セラミックスの結晶配向プロセス

- 1 はじめに
- 2 TGG 法
- 3 ビスマス層状構造強誘電体における配向機構
- 4 微細構造の均一化
- 5 まとめ

## 第3節 結晶配向性非鉛系圧電セラミックスの微細構造制御

- 1 はじめに
- 2 微細構造の特徴
- 3 結晶配向性セラミックスの微細構造形成過程
- 4 粒径制御
- 5 まとめ

## 第4節 ビスマス層状化合物配向セラミックスの圧電特性

- 1 はじめに
- 2 配向制御による周波数温度特性の改善<sup>7,8</sup>
  - 2.1 TGG 法による配向セラミックスの作製
  - 2.2 カット角調整による周波数温度特性の改善
  - 2.3 配向度調整による周波数温度特性の改善
  - 2.4 SBN 配向セラミックスの高温特性
- 3 配向セラミックスのハイパワー圧電特性<sup>11,12</sup>
- 4 強磁場成形による積層配向試料の作製<sup>16</sup>
- 5 まとめ

## 第5節 強磁場と板状粒子を用いたBi TiNbO<sub>3</sub> 圧電セラミックスの2軸配向制御

- 1 はじめに
- 2 板状粒子のみ、または強磁場のみを用いた配向制御
- 3 板状粒子と強磁場を用いた配向制御
- 4 まとめ

## 第10章 その他の高機能化

### 第1節 欠陥制御による非鉛圧電材料の高機能化

- 1 緒言
- 2 PZT セラミックスにおける電界誘起歪みの発現メカニズム
  - 2.1 電界誘起歪みに影響を及ぼす因子
  - 2.2 粒間弾性歪み整合
- 3 ドメイン構造と格子欠陥の相互作用
  - 3.1 相互作用 1—ドメイン内部における格子欠陥の影響—
    - 3.1.1 欠陥ダイポール (D) の安定配列
    - 3.1.2 ドメイン内部における欠陥ダイポール (D) の配列
    - 3.1.3 欠陥ダイポール (D) によるドメイン構造の復元
  - 3.2 相互作用 2—ドメイン壁における格子欠陥の影響—
    - 3.2.1 90° ドメイン壁に形成される電場
    - 3.2.2 90° ドメイン壁と酸素空孔の相互作用
- 4 Bi Na TiO<sub>3</sub> 系セラミックスにおける研究の進展と問題点
- 5 まとめと将来展望

### 第2節 シェアモードを用いた非鉛系圧電材料の応用

- 1 非鉛系圧電材料研究の意味と必要性
- 2 非鉛系圧電材料の評価法の問題点
- 3 KNbO<sub>3</sub>-NaNbO<sub>3</sub> 系材料のシェアモード圧電定数
- 4 高 Q 材料の開発
- 5 シェアモードを利用した超音波モータ
- 6 シェアモードを利用したインクジェットヘッド
- 7 まとめ

### 第3節 Ni 内部電極積層無鉛圧電セラミックスの研究

- 1 はじめに
- 2 無鉛圧電セラミックス組成の検討
- 3 (K, Na)NbO<sub>3</sub> 系セラミックスの耐還元性調査
- 4 Ni 積層 (K, Na)NbO<sub>3</sub> 系セラミックスの試作・評価
- 5 まとめと今後の課題

## 第 III 部 圧電材料の応用

### 第 1 章 圧電アクチュエータ

#### 第 1 節 Piezoelectric Actuators Development History and the Future

- 1 Introduction
- 2 History of Piezoelectric Actuators
- 3 Actuator Materials
  - 3.1 High Strain Materials
  - 3.2 High Temperature Materials
  - 3.3 Phase-Change Materials
  - 3.4 Polymer Actuators
  - 3.5 High-Power Piezoelectrics
  - 3.6 Lead-Free Piezoelectrics
  - 3.7 Photostrictive Actuators
- 4 Actuator Designs
  - 4.1 Actuator Components
  - 4.2 Ultrasonic Motors
  - 4.3 MEMS Devices
- 5 Drive Techniques
  - 5.1 Pulse Drive Methods
  - 5.2 Piezoelectric Transformers
  - 5.3 Piezoelectric Energy Harvesting
- 6 Application
  - 6.1 Inkjet Printer
  - 6.2 Diesel Injection Valve
  - 6.3 Piezoelectric Pump
  - 6.4 Ultrasonic Cleaner
  - 6.5 Smart Wing with Ultrasonic Motors
- 7 Future Research Trend

#### 第 2 節 内外のセラミックアクチュエータの研究開発動向

- 1 序論
- 2 セラミックアクチュエータ材料
- 3 アクチュエータのデザイン
- 4 駆動/制御方式
- 5 デバイスへの応用
  - 5.1 精密位置決め機構
  - 5.2 制振機構
  - 5.3 小型モータ
- 6 結論

#### 第 3 節 ナノメータアクチュエータの提案

- 1 まえがき
- 2 ナノメータアクチュエータとは
- 3 市場ニーズ
- 4 実現手段と適性
- 5 超音波アクチュエータの提案
- 6 電歪公転子の資質
- 7 量子化制御
- 8 メカトロニック・フィード・バック
- 9 実現のための問題点
- 10 まとめ

#### 第 4 節 マイクロアクチュエータ

- 1 はじめに
- 2 積層セラミックアクチュエータの構造
- 3 積層セラミックアクチュエータのマイクロ変位量
- 4 その他のアクチュエータ特性
- 5 積層セラミックアクチュエータの応用動向

#### 第 5 節 積層圧電アクチュエータの変位特性に寄与する内部電極構造因子の解析

- 1 はじめに
- 2 積層圧電アクチュエータの変位量を決定する因子
- 3 積層圧電アクチュエータにおける内部電極構造と変位特性との関係

- 3.1 内部電極層自体による変位阻害の実証
- 3.2 端面圧電不活性部による変位阻害の実証
- 4 内部電極層自体の変位阻害のシミュレーション技術と解析結果
  - 4.1 シミュレーション技術の必要性
  - 4.2 シミュレーション手法 (FEM 解析)
  - 4.3 電位分布の内部電極層構造依存性
  - 4.4 残留応力の内部電極層構造依存性
  - 4.5 変位特性の内部電極層構造依存性
- 5 まとめと今後の展開

## 第2章 超音波モーター

### 第1節 超音波モーター

- 1 はじめに
- 2 原理
- 3 定在波型モーター
  - 3.1 モード変換型
- 4 複合モード型
- 5 進行波型／モード回転型モーター
- 6 応用
- 7 むすび

### 第2節 非鉛積層圧電セラミックスを用いた小型超音波モーター

- 1 はじめに
- 2 モーターの設計
  - 2.1 設計指針
  - 2.2 圧電素子
  - 2.3 モーター構造
- 3 積層圧電セラミックスの作製
  - 3.1 (Sr, Ca) NaNb O の特性と改良
  - 3.2 積層圧電セラミックスの設計と特性
- 4 モーターの作製とその特性
  - 4.1 モーターの作製と測定方法
  - 4.2 モーター特性
- 5 アレイ形積層圧電セラミックスによる特性改善
- 6 モーター特性の期待値
- 7 おわりに

### 第3節 非鉛積層圧電セラミックスを用いた小型超音波モーターの研究

- 1 はじめに
- 2 モーター設計の方法
  - 2.1 モーター構造と設計規則の探索手順
  - 2.2 モーター特性と関係式
  - 2.3 シミュレーションと検証方法
- 3 モーターの設計規則
  - 3.1 シミュレーションと検証結果
  - 3.2 モーターの設計規則
- 4 トルク重視型モーターの試作と特性評価
  - 4.1 圧電素子
  - 4.2 モーターの設計と作製
  - 4.3 特性評価
- 5 おわりに

## 第3章 エネルギーハーベスト

### 第1節 圧電素子一究極のエコ発電

- 1 本論文の目的と概要
  - 1.1 目的：「振動のエネルギー」を利用した発電技術を研究開発する
  - 1.2 『発電床』（『発電床』の提案と研究開発）
- 2 『発電床』
  - 2.1 『発電床』とは
  - 2.2 『発電床』の原理開発
  - 2.3 『発電床』の科学的意義と社会的意義

- 3 『振力電池』
  - 3.1 『振力電池』の開発にあたって
  - 3.2 『振力電池』の特長
- 4 『振力電池』の応用事例
  - 4.1 『振力リモコン』
  - 4.2 『発電靴』
  - 4.3 橋・道路発電
- 5 『発電床』および『振力電池』の将来展望
  - 5.1 ユビキタス電源
  - 5.2 看護システムやセキュリティシステムへの応用
  - 5.3 『振力ライト』～車や高架下等への応用～
- 6 結言

## 第2節 圧電薄膜を用いた MEMS 振動エネルギーハーベスト

- 1 はじめに
- 2 Ti 基板上に形成した PZT 薄膜振動発電素子
- 3 転写エピタキシャル PZT 薄膜を用いた振動発電素子
- 4 まとめ

## 第4章 圧電トランス

### 第1節 圧電トランス

- 1 まえがき
- 2 圧電トランス
  - 2.1 原理と特性
  - 2.2 負荷（冷陰極管）特性
  - 2.3 制御方式
- 3 圧電インバータ特性
- 4 圧電トランス用材料
- 5 信頼性
- 6 まとめ

### 第2節 冷陰極管用圧電インバータユニット

- 1 まえがき
- 2 圧電トランス
  - 2.1 セラミック材料
  - 2.2 圧電トランスの構造
  - 2.3 厚み幅横効果型積層圧電トランス
- 3 冷陰極管用圧電インバータ
  - 3.1 冷陰極管からの要求条件
  - 3.2 圧電トランスの駆動回路
- 4 まとめ

### 第3節 セラミックインテグレーション技術を用いた電源用圧電トランス

- 1 はじめに
- 2 輪郭拡がり型圧電トランス
- 3 圧電トランスの特性
- 4 むすび

## 第5章 超音波センサ

### 第1節 PbTiO<sub>3</sub> 薄膜 Si モノリシック超音波センサ

- 1 素子構造および動作解析
- 2 超音波センサの作製
  - 2.1 異方性エッチングによる微小カンチレバーの作製
  - 2.2 PbTiO<sub>3</sub> 薄膜の成長
- 3 超音波応答特性
- 4 アレイセンサとその特性

### 第2節 高感度 AE センサの開発

- 1 AE と AE センサ
- 2 先端材料評価のための AE センサの条件
- 3 圧電素子の検出感度と振動モード
- 4 電気回路モデルによる解析
- 5 AE センサとしてのシステム設計と特性

- 6 本センサによる AE 計測結果
  - 6.1 ムライトの AE による破壊起点評価
  - 6.2  $\beta$  アルミナの破壊機構評価
  - 6.3 FRP の弾性波伝播特性評価
- 7 高感度 AE 検出による材料評価の可能性

### 第3節 傾斜機能圧電セラミックスと超音波トランスデューサへの応用

- 1 はじめに
- 2 セラミック・バッキング FGM 超音波トランスデューサの検討
- 3 FGM の試作
- 4 超音波放射特性の測定例
- 5 まとめ

## 第6章 加速度センサ

### 第1節 加速度センサ

- 1 はじめに
- 2 エアバッグ用加速度センサの変遷
- 3 検出素子について
- 4 検出体部
- 5 信号処理回路
- 6 加速度センサの構造
- 7 加速度センサの特性
- 8 信頼性
- 9 おわりに

### 第2節 表面実装型ショックセンサ

- 1 はじめに
- 2 要求性能
- 3 原理と構造
  - 3.1 圧電素子
  - 3.2 圧電素子の保持方法
  - 3.3 全体構造
- 4 PKGS シリーズの特性
- 5 将来の展望

## 第7章 ジャイロ

### 第1節 圧電ジャイロ設計の基礎

- 1 まえがき
- 2 動作原理と等価回路
  - 2.1 動作原理
  - 2.2 基本等価回路
  - 2.3 漏れ出力の影響を考慮した等価回路
- 3 信号検出法
  - 3.1 同期検波出力
  - 3.2 最大出力を得るための位相シフト
  - 3.3 漏れ出力の低減
- 4 感度
- 5 周波数応答特性
- 6 支持による影響

### 第2節 セラミック単体円柱型振動ジャイロ

- 1 はじめに
- 2 振動子の形状と支持構造
- 3 振動子の材質
  - 3.1 圧電セラミック単体円柱形振動子
  - 3.2 エリンパー複合振動子とセラミック単体振動子の比較
  - 3.3 駆動検出回路による温度補償
- 4 共振周波数の設定
  - 4.1 共振型と非共振型
  - 4.2 共振型ジャイロの周波数特性
- 5 特長と仕様
- 6 応用と今後の展開