

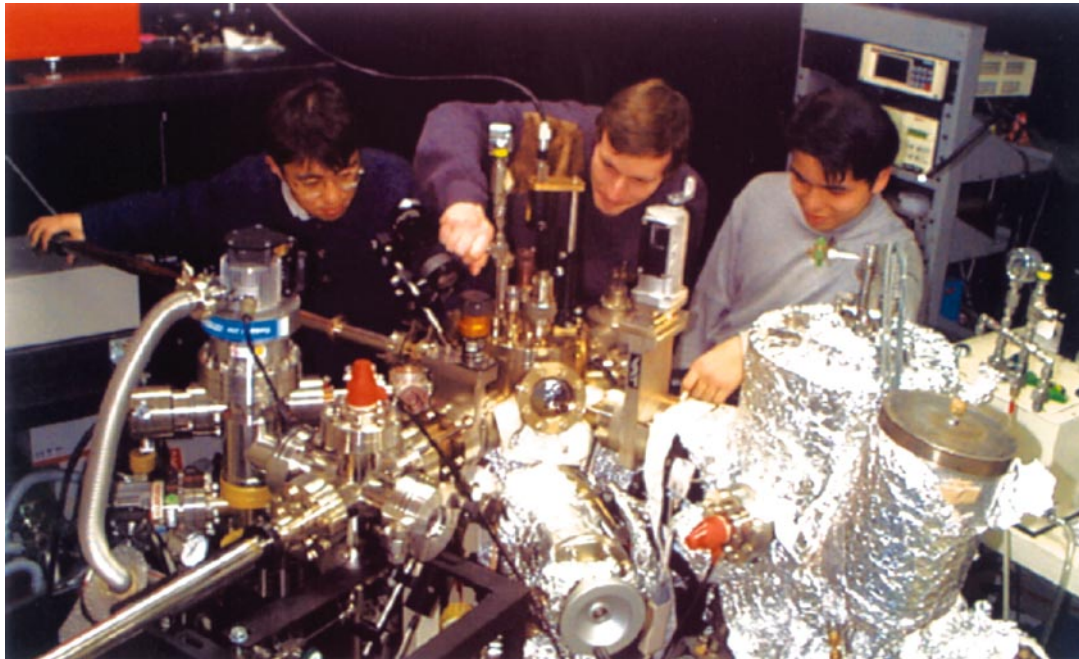
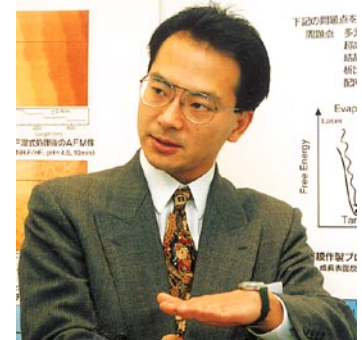
Growth-front of giant unit cell ionic crystals: Clue towards perfect epitaxy

巨大ユニットセルイオン結晶の 成長界面挙動と気相成長の完全制御

プロジェクトリーダー 川崎 雅 司

東京工業大学

大学院総合理工学研究科 助教授



1. 研究目的

地球は主に金属酸化物でできています。人類がはじめて手にした道具も、石器や土器などの金属酸化物です。産業革命以来、鉄などの金属、石油化学による高分子、そして半導体と、人類は地球から採掘した鉱物にエネルギーと智恵を注入することで様々な新材料を発明し、基幹材料を変遷させながら繁栄してきました。世紀末の今、ルネッサンスを起こしたいと思っています。科学と産業と環境が調和した人類の進歩を牽引する担い手として、金属酸化物を再び材料のスターにしたいと思っています。我々が狙っているのは、原子レベルで精緻に制御した薄膜技術の開発をベースに、果敢に新現象や新機能を探求心し、新規な光・電子・磁気デバイスを開発することです。

金属酸化物は一芸に秀でた天才児の集まりです。対象とする元素は、周期表のほとんどの元素です。それだけに、ちょっと聞いただけで「凄い」と思える物性を発揮し、超機能デバイスにいかにも使えそうな物質がたくさんある一方で、何となく冴えない物質もあります。共通して言えるのは、他の材料系では不可能なほどの多様で巨大な物性的特徴がある点（表の特性値参照）と、構成元素が多いため薄膜作製の制御が困難な点です。天才に才能を発揮させるのにも、凡才の秘めたる能力を引き出すのにもそれなりの舞台が必要です。その舞台であると感じるのが、我々が追求している金属酸化物薄膜成長の原子レベル制御です。

本プロジェクトでは、ミクロな原子のダイナミクス実験とマクロな熱力学的考察から、金属酸化物薄膜の結晶成長の制御要因を明らかにします。超機能を持つ酸化物群で構成される原子レベルで制御されたヘテロ構造において新現象の発見を目指し、そのデバイス応用を推進し、「酸化物エレクトロニクス」の黎明をリードしたいと思います。

表 各種金属酸化物の超機能とデバイス

材 料	物 性	主役を演ずる粒子	特 性 値	デ バ イ ス
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	高温超伝導	クーパーペア	凝縮エネルギー:20meV (Nb:3meV)	ジョセフソン接合 マイクロ波デバイス
ZnO	ワイドギャップ 励起子発光	エキシトン	励起子結合エネルギー:60meV バンドギャップ:3.37eV (GaAs:4meV, 1.5eV)	高効率紫外発光 ダイオードレーザー 表示素子・照明
(LaSr) MnO_3	超巨大磁気抵抗	スピン偏極電子	スピン偏極率:100% (Ni:11%)	磁気記録センサーヘッド
$\text{La}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{TiO}_3$	高温量子常誘電性	フォノン?	???	周波数可変高周波素子

2. 研究の内容

結晶成長の基礎過程を考えると、結晶の周期構造の繰り返しの単位であるユニットセルでそのダイナミクスを考えるのが普通です。我々が対象としている物質群は、ユニットセル内に10個程度と多数の原子を含み、また、その配列様式や相互の距離に特異な物性の起源があります。金属や半導体など物性が電子の数と周期性で決まる単純な物質と、有機物やDNAなどミクロな異種原子の配列そのものに物性や情報の起源がある物質の中間に当たるかも知れません。その複雑な構造は、いわば「勝手に出来る」構造で、自然の神秘を感じざるを得ません。その過程に、原子レベルでのその場分析技術と自然の摂理ともいべき熱力学・統計力学をベースにした深い考察を武器に切り込みたいと思っています。酸化物の超機能を活かしたデバイス応用だけでなく、人為的な原子配列の制御で、前人未達の超機能デバイスを手のひらに乗せたいという野望があります。研究内容は次の通りです。

(1) 酸化物の結晶化学

酸化物は、無機結晶化学の王道でした。特に遷移金属元素は、電子数やサイズを系統的に変えられるので、基礎的な研究には都合が良かったわけです。これまでの知的欲求を満たしてきた資産を再検討し、「役に立つ酸化物」という観点からデバイス化を睨みながら結晶化学を再構築します。薄膜結晶成長における界面形成のガイドラインを抽出すると共に、遺伝子操作の概念を無機結晶の構築手法に取り入れ新物質の探索を行います。この研究は、バルク物質と薄膜人工格子の両面から攻めます。構造解析には上図の4軸X線回折等を用います。自然がどうするかを迷うような準安定な物質（例えば量子常誘電体）を形成し、光や電場・磁場などの外場で結晶構造や物性を著しく変化させる臨界状態物質の一般則の導出と物質設計・デバイス化を研究します。

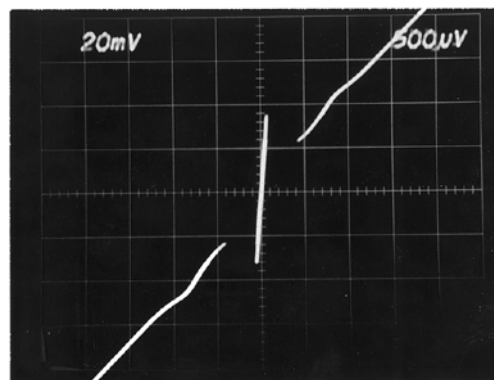
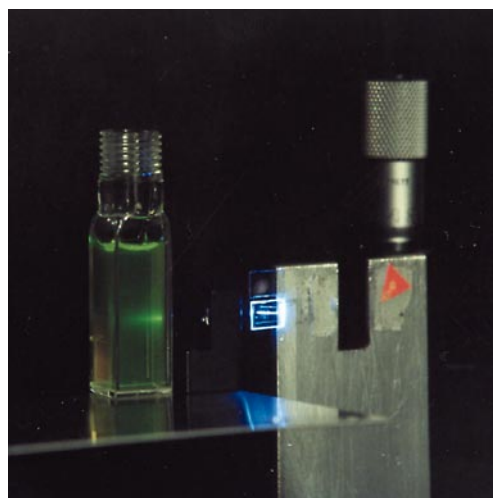
(2) 結晶最表面の3次元原子レベル分析とダイナミクス解析

酸素雰囲気中という、半導体や金属に比べdirtyな雰囲気での結晶成長のダイナミクスをその場で原子レベル分析します。超高真空装置のハードウェアの工夫と高速での信号解析技術を独自に開発し、原子が表面に到達してから拡散過程を経て結晶に取り込まれる様子をリアルタイムで明らかにします。対象とするプロセスは、基板結晶の湿式エッチング過程、基板結晶表面の高温での原子拡散過程、最表面原子層の同定と人為的制御、レーザーアブレーションによる薄膜形成過程などです。

(3) 超機能デバイスの作製と酸化物集積回路の創出

酸化物の超機能を実際に電子機器に使ってもらうまでには様々なハードルがあります。現実的には再現性良く形成でき安定に動作しコストが安いことです。一旦はこれらの要件をあえて無視して、超機能デバイスのデモンストレーションをしたいと思います。そのためには、既存の機能を高度化したり配置替えを狙うデバイスではなく、酸化物にしか出来ない機能を前面に押し出した超機能デバイスを視野に入れます。さらには、これらのデバイスをモノリシックに集積した回路を形成したいと思います。これらの狙いでベースになるのは、やはり、結晶成長の原子レベル制御技術です。

これまでの成果として、非常にありふれた物質であった酸化亜鉛薄膜の構造をナノスケールで制御することにより、室温で励起子が光る紫外レーザー発振が起こることを見出しました（写真中）。また、高温超伝導体の積層構造を原子レベルで制御したジョセフソントンネル接合の開発に成功しています（写真下）。これらのデバイスは、21世紀の高度情報化社会を支える基幹デバイスとなります。



3. 研究の体制

期 間：1996年10月～2001年3月

構 成：プロジェクトリーダー1名、コアメンバー3名、研究協力者7名（内日本学術振興会研究員2名）で構成されています。この他、下記の研究室に属する大学院学生が多数この研究に参加しています。

実施場所：この研究の主拠点は東京工業大学大学院総合理工学研究科川崎研究室ですが、東京大学物性研吉信研究室、東京工業大学応用セラミックス研究所伊藤研究室、佐々木研究室、鯉沼研究室、阿竹研究室、(株)信光社、が緊密な連絡を取ってプロジェクトを進めています。他にも、東京大学や理化学研究所、電総研、金材研、融合研等と共同研究を行っています。