

JSR13 企画講演報告

企画1 『新しい軽量 Mg 合金研究の放射光による展開—構造・特性・機能』報告

奥田浩司 (京都大学工学研究科)

企画趣旨

Mg に微量の希土類と遷移金属を添加した Mg-RE-TM 合金は高温特性に優れる日本発の軽量構造合金として注目されている。この合金の強化相は c 軸方向に RE と TM の偏析と積層欠陥が周期的に積層する長周期秩序構造 (Long-Period Stacking Order: LPSO) を示す。組成変調と構造変調が同期して長周期の規則構造が自発的に形成される (シンクロ LPSO) 実用構造合金は他に例がなく、その形成機構、構造科学、力学特性に関して放射光科学の知見を多面的に活用する事により、材料科学・工学の観点から大きな発展が期待される。

本企画講演では先導的に本合金の開発にかかわってきた国内研究者を交え、参加者に材料の特徴、現状の概観と放射光の役割の重要性を示し、さらなる展開への参加を呼びかけることを目的とした。

講演構成

0. 趣旨説明 奥田浩司 (京都大学工学研究科)
1. 「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」 河村能人 (熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター)
2. 「Mg 合金中長周期積層構造相の放射光構造解析」 木村 滋 ((公財)高輝度光科学研究センター)
3. 「LPSO 構造を有する Mg 合金の塑性変形の特徴」 東田賢二 (九州大学大学院)
4. 「X 線マイクロトモグラフィーによる損傷・破壊の 3D/4D 解析」 戸田裕之 (豊橋技術科学大学)
5. 「回折コントラストトモグラフィーによる結晶組織観察と損傷評価への適用」 塩澤大輝 (神戸大学大学院)
6. 「高エネルギー放射光ひずみスキニング法の Mg 金属への適用」 菖蒲敬久 (日本原子力研究開発機構) 鈴木賢治 (新潟大学)
7. 総括 木村 滋 ((公財)高輝度光科学研究センター)

講演概要

趣旨説明に続き、「シンクロ型 LPSO 構造の材料科学」の演題で、LPSO 型 Mg 合金の発見、実用化に関して中心的な役割を果たしている熊本大学河村能人氏により、新 Mg 合金の特徴と研究開発の現状について材料開発の観点からの紹介がなされた。その中で Mg-RE-TM 合金は発見も実用化研究も日本国内で進められている点、鉄やアルミニウムと比較すると長周期積層構造というはるかに複雑な構造をとりながら、従来の軽金属材料を凌駕する実用軽

量材料の特性を実現する可能性を示すユニークな材料であることが示された。一方 LPSO 構造をもつ材料群の学術的な研究は従来材料と比べると端緒についたばかりであり、放射光でこれまで培われてきた材料評価手法の適用発展によって飛躍的な材料研究の進展が期待される点が強調された。続いて「Mg 合金中長周期積層構造相の放射光構造解析」の演題で高輝度光科学研究センター 木村 滋氏により放射光による Mg 基長周期構造解析の現状が報告された。実用材料開発が先行した Mg-RE-TM 合金は構造解析が電子顕微鏡による局所解析に限られており、また、状態図の形状から均一な単結晶あるいは単相粉末を得ることが非常に難しい。このことを踏まえ、微小単結晶による定量構造解析による基盤的な知見の構築の必要性とその進行状況が示された。この発表に対してコヒーレンスを用いた 3 次元分布再構成が実現すれば、そもそもすべての構造・組織の分布が解明されるのではないかというコメントが出された。本企画で議論した LPSO 合金のように階層性を持つ複雑な組織を形成する材料の振舞いを理解する上で、どの階層 (分解能) での再構成がコヒーレンスの利用による先進評価手法として材料の特性を端的に示す知見を与えるのかは、今後の材料評価研究を考える上で重要な課題であると考えられる。

次に九州大学の東田賢二氏により「LPSO 構造を有する Mg 合金の塑性変形の特徴」と題し、この Mg 合金が示すキンク変形の機構や塑性変形の特徴についての解説とともに、放射光によって初めて解明されると期待される種々の材料科学上の未解決課題が提示された。

これまで放射光とのかかわりの少なかった材料の専門家である河村・東田両氏の概要説明と問題提起に対し、続いて材料開発評価において重要である力学特性と組織の関係を明らかにする放射光による評価手法に関する 3 件の講演が行われた。

豊橋技術科学大学 戸田裕之氏による「X 線マイクロトモグラフィーによる損傷・破壊の 3D/4D 解析」はアルミニウム合金に対して介在物やポアの疲労破壊に至る 3 次元構造の時間変化を追うことが可能であり、破壊亀裂の進行と金属内部のポアの形成成長、結晶粒界との関係が可視化できることが示された。これに対し、LPSO 合金の不均一性に対応するキンク形成や破壊現象といった特徴的な構造のイメージングに対する可能性についての質問がなされた。

神戸大学大学院 塩澤大輝氏の「回折コントラストトモグラフィーによる結晶組織観察と損傷評価への適用」は多

結晶材料で有効な回折現象を利用した組織再構成法の試みを示した。現時点では試料サイズ、分解能や同時に回折条件を満たす結晶子の数など制限があるものの、回折現象を利用するイメージング手法は歪や結晶方位関係などの多結晶構造材料で重要になる情報を含むことから、キンク変形領域での応力分布への適応など Mg 合金特有の現象解明への期待が表明された。日本原子力研究開発機構 菖蒲敬久氏による「高エネルギー放射光ひずみスキャンニング法の Mg 金属への適用」の講演では従来中性子の特徴と考えられていたバルク材料の内部応力を螺旋スリット等を併用した高エネルギー X 線で直接効率よく測定することができることが示された。放射光は微小プローブであることから継ぎ手や強加工部分などのヘテロ構造での内部歪分布を非破壊で定量評価でき、可視化手法と組み合わせる事により顕微鏡的サイズから実用サイズまでの歪の評価の道筋が聴講者に理解できた。

本企画講演は放射光を利用して材料の組織形成や相転移現象、力学特性などの材料工学的評価にかかわっている研究者と、放射光の経験はほとんどないが新規高性能軽量合金である LPSO 構造をもつ Mg 合金の開発に中心にかかわっている研究者に講演を依頼することにより、ユニークな特徴をもつ日本発の新たな軽量実用合金の研究において放射光がどのように利用されているか、利用が期待されているかが概観できる構成をとった。意図としては Mg をケーススタディーとして新しい構造材料の開発評価を現在の材料評価手法の進展の中でどのように進めていけるかという観点で、Mg に関する知識、放射光構造材料評価の予備知識がなくとも全体像が見えるプログラムを企画した。しかし初日最初の別会場と言うこともあり、参加人数の約50名は期待より少なかった。産業利用的観点をより強く打ち出した事前の宣伝をすればより多くの聴衆を集められたのではないかと考えられ、反省材料である。

企画2 『シンクロトロン光が走らせるグリーンピークル』 報告

馬場嘉信

(名古屋大学シンクロトロン光研究センター)

企画趣旨

本企画講演会は、あいちシンクロトロン光センターが、2013年度から本格稼働するのを前に、自動車産業の盛んな中部地域において、シンクロトロン光を活用したグリーンピークルの研究を進めておられる最先端の研究者の先生方に御講演いただくことで、シンクロトロン光を用いたグリーンピークル実現のための研究開発の成果と動向に関する意見の交換、共通の学術的・技術的課題の解決、あるいは新分野の開拓を目指した迅速な内外の情報交換を目的として開催した。当日は、100名程度の参加者があり、大変熱気のある会場において、5件の最先端研究成果の発表と質疑応答および総合討論を実施し、活発な意見交換が行われた。

講演構成

- 趣旨説明 馬場嘉信
(名古屋大学シンクロトロン光研究センター)
- クリーンディーゼル触媒開発のための放射光利用 薩摩 篤 (名古屋大学工学研究科・名古屋大学グリーンモビリティ連携研究センター)
- シンクロトロン光を利用した次世代自動車用電池材料開発 坂野 充 (トヨタ自動車材料技術統括部)
- 時空間分解 XAFS 新ビームラインと次世代燃料電池触媒の構造反応 in situ キャラクタリゼーション 岩澤康裕 (電気通信大学燃料電池イノベーション研究センター)
- 自動車用三元触媒の貴金属挙動解析 堂前和彦 (豊田中央研究所分析研究部)
- ゴム階層構造の解析と制御による低燃費タイヤの開発 岸本浩通 (住友ゴム工業材料開発本部材料第三部)
- 総合討論

講演概要

- 本企画講演会の趣旨説明が馬場より行われ、シンクロトロン光を活用したグリーンピークル開発に向けて、世界最先端の研究を行われている大学・企業の5名の先生方による講演が行われることが説明された。さらに、総合討論を行うことで、シンクロトロン光によるグリーンピークル研究の現状の研究到達点の俯瞰と将来展望を行う予定であることが述べられた。
- 本講演では、まず、名古屋大学で実施されているグリーンピークル研究内容が紹介され、自動車用電池、自動車用材料開発などの研究が進んでいることが示された。その後、薩摩篤先生(名古屋大学)が進めておられるグリーンディーゼル排ガス触媒のナノ材料研究が紹介された。特に、シンクロトロン光を利用した XAFS による触媒開発の多くの実例が示され、グリーンディーゼル排ガス触媒開発におけるシンクロトロン光利用の重要性が指摘された。
- 本講演では、まず、坂野充先生(トヨタ自動車)が開発されてきた、HV、PHV、EVの最新電池技術が紹介された。さらに、電池開発において、シンクロトロン光利用した in situ XAFS による解析が重要であり、本方法により、高性能電池の開発が可能になることが紹介された。さらに、シンクロトロン光 XRD 測定により新規固体電解質の構造が精密に決定できることが紹介され、トンネル構造により高電流密度を達成できることが紹介された。最後に、シンクロトロン光を活用した次世代自動車用電池材料開発の将来展望が紹介された。
- 本講演では、岩澤康裕先生(電気通信大学)が進めておられる、高性能な次世代燃料電池触媒の研究最前線が紹介された。次世代燃料電池触媒開発のためには、触媒自身の構造速度論およびダイナミクス解明が重要であるにもかかわらず、この測定が極めて困難であることが示された。触媒の構造速度論・ダイナミクス解明のためにシンク

ロトロン光による in situ XAFS が極めて重要であり、これを実現するために、時空間分解新ビームラインの建設が進んでおり、時空間分解 XAFS を用いた燃料電池触媒の構造反応 in situ キャラクター化の実例が多数示された。特に、燃料電池白金触媒での反応機構を世界で初めて解明された例が示された。これらの成果からシンクロトロン光が次世代燃料電池開発において、非常に重要であることが示された。最後に、放射光科学・技術が、何を持って人類社会に貢献できるかについて述べられ、常にイノベーションを創出するエンジンとしての放射光科学・技術の重要性が指摘された。

5. 本講演では、堂前和彦先生（豊田中央研究所）から自動車の環境汚染を防ぐための触媒について、シンクロトロン光を利用した研究成果が紹介された。排ガスの汚染物質は20数年前の100分の1以下に低減できたことが示された。その鍵を握ってきたのが三元触媒の開発にあることが紹介された。さらに、この研究を進めるために SPring-8 に建設したトヨタ専用のビームラインによるミリ秒オーダーの XAFS の測定が紹介された。これらの成果から、優れた自動車用三元触媒の開発についての現状と将来展望が紹介された。

6. 本講演では、岸本浩通先生（住友ゴム株工業）から自動車産業における自動車燃費性能のうち20%はタイヤによりエネルギーロスがあることが示され、低燃費タイヤの開発の重要性が指摘された。タイヤゴム中にカーボンやシリカナノ材料を配合することで、タイヤの強度向上やグリップ向上が得られるが、燃費が悪くなることが課題であり、この課題を解決するために、シンクロトロン光によるサブミクロンレベルのシリカ解像構造の解析の重要性が指摘された。SPring-8 において、新たなビームラインを建設することで、マイクロメートルからナノメートルにわたる広範囲レンジで、タイヤ中のシリカ階層構造解析が可能になり、低燃費タイヤの開発が達成できることが示された。最後に、シンクロトロン光に基づく、低燃費タイヤ開発の将来展望が示された。

7. 本企画講演で講演された5名の先生方の各講演に対して、活発な討論が行われており、本総合討論では、その質疑応答のまとめと、シンクロトロン光を利用したグリーンピーク研究の重要性がまとめられた。参加者からは、自動車産業における、放射光科学の重要性と今後の課題が明確となった旨の意見を多数いただいた。シンクロトロン光によるグリーンピーク研究が益々進展することを期待して報告としたい。

企画3 『供用を開始した SACLA と X 線自由電子レーザー利用の展望』報告

矢橋牧名（理研 XFEL 研究開発部門）

企画趣旨

SACLA は、2011年6月に初レーズングを観測し、

2012年3月より供用運転を開始した。運転は概ね順調に行われ、成果も出始めている。本企画は、施設者及び各分野の利用者、LCLS の関係者の講演から構成される。SACLA の一年の総括を行うとともに、今後の XFEL 利用技術とサイエンスの展望について議論を行う。

企画参加人数 約140人

講演構成

司会 田中 均（理研播磨）

1. 「進化する SACLA」 矢橋牧名（理研播磨） 10分
2. 「SACLA の実験ステーション」
登野健介（JASRI） 20分
3. 「SACLA における分光技術開発とその利用」
犬伏雄一（理研播磨） 20分
4. 非線形応答が支配する XFEL 利用研究」
玉作賢治（理研播磨） 20分
5. 「超短パルス粉末 X 線回折法を用いた材料科学」
松原英一郎（京大） 20分
6. 「What we have learned about x-ray FEL's: the first three years at LCLS」 John Arthur（SLAC） 30分

講演概要

田中 均氏の司会のもと、はじめに、矢橋から、企画の趣旨と SACLA の概要紹介が行われた。2012年3月から SACLA の供用運転が開始され、概ね順調に運転が行われていること、利用者と施設が密に協力して立ち上げを行っていること、加速器・ビームラインの成果が論文として出始めたこと、及びビームラインの増設・シード化等の将来計画について紹介が行われた。登野健介氏からは、SACLA の実験ステーションの報告が行われた。特に、レーザーと XFEL のアライバルタイミングを計測するモニターの開発が行われ、10 fs 程度という高い時間分解能が得られていること、1 μm 集光ビームがルーティンの実験に使用され、コヒーレントイメージング、非線形光学等に幅広く利用されていること、さらにナノ結晶構造解析のためのインジェクター・検出器の技術開発が進んでいることが紹介された。次に、犬伏雄一氏から、SACLA における分光技術開発と応用に関する発表が行われ、様々なタイプのシングルショットスペクトル計測法の開発と、XFEL のパルス幅計測や吸収・発光分光への応用について紹介された。次いで、玉作賢治氏から、非線形光学現象の研究について紹介がなされた。現象自体の物理としての魅力に加えて、パルス幅計測等への応用も期待される。また、さらに入射光のパワー密度を高めていくと非線形効果が顕著になるため、構造解析等においても影響を考慮する必要があるという指摘がなされた。松原英一郎氏から、レーザーポンプ・XFEL プローブ手法に基づく材料研究への応用が紹介された。粉末回折法が適用可能なことがわかり、実材料への展開が期待されると報告された。最後に、John Arthur 氏から、LCLS の現状について紹介がなされた。LCLS は利用開始から4年近くが経過し、最近は順調

に利用成果も出始めている。一方で、ビームタイムの総量の不足が顕著になっており、様々な対策が検討されている。この一環として、LCLS-IIの計画が3億ドルオーダーの予算規模で進められている。また、LCLSのビーム性能が紹介された。SACLAと比較すると、パルスエネルギー（パルス当たりの光子数）はLCLSが上回っているが、ビームの安定性（強度・ポインティング・波長等）、短パルス性、集光特性等についてはSACLAの方が優れているようである。

会議後の参加者との雑談等も踏まえると、SACLAは施設・利用の両面で着実に歩き出したこと、またLCLSと比べて特色ある光源になっていること、という2点が強調されたセッションであった。今後は具体的な利用成果を加えながら、学会に継続して報告を行っていききたい。

企画4 『未踏の放射光科学への挑戦：若手の視点から』 報告 鈴木基寛、渡部貴宏（JASRI）

企画趣旨

本企画の主題は、現在の高エネルギー光科学が及んでいない未踏領域へのアプローチに対する一提案であった。プローブとして光あるいはX線の特性を原理的な限界まで突き詰めた場合、どのような観測が可能かを提案すべく、将来を担う若手・中堅から、自由かつ純粋な科学的興味に基づいた議論を行った。関連して、最近注目されている将来光源の特徴についても整理した。

企画参加人数 約100人

講演構成

1. 「趣旨説明」 鈴木基寛（JASRI）
2. 「高強度レーザーによるアト秒光科学の展望」
板谷治郎（東大物性研）
3. 「生体高分子単粒子の高分解能構造解析の可能性」
徳久淳師（理研）
4. 「理論からみた場としての放射光と物質」
澤田桂（理研）
5. 「極限環境物性：パワーレーザー超高压と新しい観測の目」
尾崎典雅（阪大工）
6. 「素粒子科学からみた光科学の可能性」
浅井祥仁（東大理）
7. 「将来光源の多様な可能性」 渡部貴宏（JASRI）
8. まとめ

講演概要

冒頭、鈴木より本企画の趣旨が説明された後、板谷氏から高強度超短パルスレーザー、特に高次高調波の開発状況、原理、方向性について発表があった。今やアト秒の軟X線コヒーレントパルスが実現し、今後は光パラメトリックチャープパルス増幅（OPCPA）等による赤外光の高次光長波発生（HHG）によって発生波長がkeV領域へ及ぶという展望が示された。こうした最先端の光を用いた超高速非線形分光研究への期待で講演は締めくくられた。質

疑応答では、赤外光HHGによって達成可能なパルスエネルギー性能などが議論された。

つづいて、徳久氏からXFELを用いたコヒーレント回折による単一生体粒子の高分解能イメージングの講演があった。彼らが開発したアルゴリズムを用いて100万枚以上の回折像を処理することで、量子雑音が存在する条件下でも原子分解能（ $\sim 3 \text{ \AA}$ ）での分子イメージングを実現できるという見込みが示された。この大規模計算を京コンピュータに実装することで、実験と並行して現実的な時間内に解析が行える見込みである。また、試料の放射線損傷に対する主要な寄与である電場電離過程を抑制し、より高分解能のイメージングを可能とするために、将来のアト秒X線パルスの利用が提案された。質疑応答では、本アルゴリズムを実験に適用する場合、タンパク分子に配位した水分子の効果や真空中での試料の変性の影響が議論された。

澤田氏からは、光を物質観測のための脇役ではなく主役として取り扱う観点、力学や電気回路とのアナロジーに着目してメタマテリアル中の光応答を理解する概念、更には光との「対話」の仕方についてユニークかつ興味深い講話がなされた。より具体的な話題として、Axionを介して電場と磁場がカップルするなどの光学現象や観測提案が紹介された。質疑応答では、高エネルギー（短波長）を持つ放射光の特性を生かした光学現象の具体例について議論された。

尾崎氏からは、パワーレーザーショックによるテラパスカル環境と放射光観測のカップリングによる極限環境物性研究の展開が示された。超高压状態で瞬間的に発現する新たな物質相を観測するのみならず、転移状態を凍結して常圧状態に移送することで新物質の創生を目指すというビジョンが提案された。超高压下では原子の個性が消失していくことや、局在的な電子状態から遍歴状態へ移行する高压下金属転移など興味深い話題がつつぎと提供され、物性物理のフロンティアとしての期待感を抱かせるものであった。

浅井氏からは、素粒子分野から見た光科学の可能性について講演いただいた。素粒子といえば2012年は大型ハドロン衝突型加速器（LHC）によるヒッグス粒子の発見が世間を賑わせたが、これは17番目の素粒子が見つかったというだけでなく真空がヒッグス場で満たされているという点が重要であるということ、そしてLHC実験のもう一つの目的に超対称性の発見があることなど、まさに最先端の素粒子物理学のお話を聞かせて頂いた。そして、直接反応はしない光と光が真空に潜んでいるものを介して反応する現象を観測する場合、meV領域のダークエネルギーからkeV領域のQED、MeV領域のQCD、更には100 GeV超の標準理論を越える大発見まで、対象とする現象によって様々なエネルギーの光子が必要といった興味深い話が紹介された。これは「真空」を探る研究であるが、この他に

「時空」を探るウンルー効果, 「未知粒子」を探る弱結合軽粒子探索など日頃馴染みのないテーマが, 10~20年後の将来光源で手の届くところまで来ているという夢のある話が紹介された。将来光源が, まさに対象研究分野を大きく, 魅力的に広げていく可能性を感じる発表であった。

最後に, 渡部より, 将来光源の多様な可能性が紹介された。蓄積リング, FEL といった従来光源の原理的な違いがおさらされた後, 昨今発展が著しいレーザーベースの X 線光源が紹介された。特に, レーザー・プラズマ加速ベースの XFEL, プラズマ内の電子の横方向振動を利用したペータロン放射, プラズマ内の相対論的飛翔鏡を用いた光のドップラーシフト, 最近注目されている HHG について, そのメカニズムや期待される性能が整理された。会場からは, これらの手法の R&D を実際に行っていく際

の難易度に関する質問がなされた。

講演を終えて

本企画は現在の光源性能に依らない未踏の放射光科学を議論するものであり, 講演者にはある意味難しい注文をした。しかしながら, 発表では期待通り未踏の放射光科学を多岐にわたって提案して頂き, また参加者の方々からも積極的な質問, コメントを頂いた。この場を借りて感謝申し上げます。

また, 若手の視点ということが本企画のもうひとつの特徴であった。「若手」の解釈は様々だが, 放射光科学の将来像の議論を様々な視点から行い, 議論を活性化してることが重要であるのは間違いない。今回の企画がいくらかでも刺激となれば幸いである。