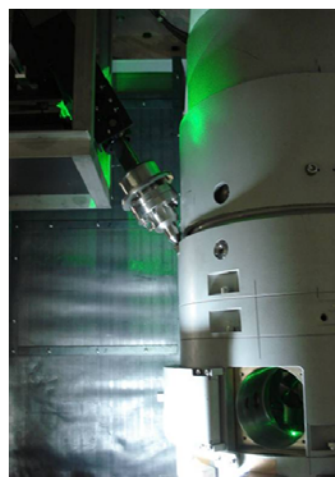




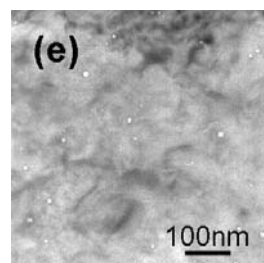
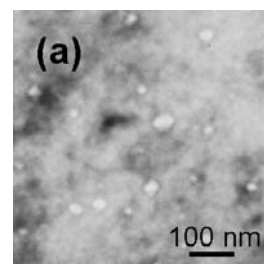
レーザー光と電子ビームの同時照射実験成功： 原子ボイドの集合を $1 + 1 < 1$ 効果で抑制？

研究成果のポイント

- ・レーザー超高压電子顕微鏡の開発に成功(2007)
- ・レーザー照射で原子空孔ができることを直接証明(2011)
- ・レーザー照射によって原子の空孔(欠損)が自己集合化*1することを発見(2012)
- ・レーザー光ならびに電子線を同時に照射しながら超高压電子顕微鏡内での空孔ボイド集合体の成長のその場観察に成功
- ・(レーザー+電子)同時照射の方が電子線照射のみより空孔ボイドが少なること ($1 + 1 < 1$) を発見：抑制制御が可能



北海道大学レーザー超高压電顕



北海道大学所有
レーザー超高压電子顕微鏡

空孔ボイドの電子線のみ(上図)と
レーザー同時照射(下図)の場合

研究成果の概要

北海道大学、日立製作所による研究グループは、レーザー照射により原子の空孔(欠損)ができ、それが集まってボイド形成と呼ばれる空孔集合体が成長する現象を見出しました。その際、北海道大学のレーザー超高压電子顕微鏡(レーザー発振装置を搭載した130万ボルトの超高压電子顕微鏡*2)を用いてレーザー光と電子線を同時に照射し、空孔ボイド形成を抑制・制御することに世界で初めて成功しました。材料内に発生するボイドは、スエリングという材料の膨れ現象や、機械的強度の変化をもたらすので、ボイド発生を抑制するための解決が必要とされてきました。今回の研究成果により、宇宙環境で使用したり、放射線場などの過酷な環境で使用することを目的とした、高い信頼性を要求される材料の研究開発が、飛躍的に進むものと期待されます。

研究グループは、高エネルギーパルスレーザー光(30mJ/cm²)と電子線(130万ボルト)をステンレス試料に照射すると、内部にナノメートルサイズの空孔が集まってできるボイドと呼ばれる空孔集合体が形成される現象を発見しました。その様子を観察実験するため、北海道大学の研究チームが短パルスレーザー光を入射できる超高压電子顕微鏡(レーザー超高压電子顕微鏡)を開発し、今回初めてレーザー・電子線の同時照射実験に成功しました。

原子やその空孔ひとつひとつは小さくて見えませんが、それが集まって集合体を作るため、レーザー照射によって空孔が材料内に大量に導入されることを見出しました。また、できた空孔集合体は、照射時のエネルギー(パワー)や照射時間、試料温度などの条件によって成長の速さが変わることわかりました。本研究の最大の発見は、電子線単独あるいはレーザー照射を行ってから電子線照射する

場合よりも、レーザーと電子線を同時に照射させる時に最もボイド形成が抑制される【1+1<1】効果の出現を実験と理論により明らかにできたことです。

本研究成果は、ネイチャー姉妹誌の Scientific Reports に 2013 年 2 月 4 日（英国時間）に掲載されました。

なお、本研究で使用したレーザー超高圧電子顕微鏡は、「ナノテクノロジープラットフォーム」ならびに「大学間連携共同利用設備群 超高圧電子顕微鏡連携ステーション第Ⅱ期」事業による共同利用装置として利用可能です。

論文発表の概要

研究論文名：The Irradiation Effect of a Simultaneous Laser and Electron Dual-beam on Void Formation（空孔ボイド形成におよぼすレーザーと電子線の同時照射効果）

著者：氏名（所属）Zhanbing Yang, Seiichi Watanabe（北海道大学）& Takahiko Kato（日立製作所）

公表雑誌：Scientific Reports（ネイチャー・パブリッシング・グループ）【オープンアクセス電子版】

<http://www.nature.com/srep/2013/130204/srep01201/full/srep01201.html>

公表日：英国時間 2013 年 2 月 4 日

研究成果の概要

（背景）

材料中の空孔（原子の欠損）の存在とその拡散は古くから知られており、材料の安定性を支配する重要な因子であるため、急冷や拡散現象、あるいは電子線、イオンなどの高エネルギー量子ビーム*3 照射により調べられてきました。一方、レーザー溶接やレーザー加工などで一般的なように、強いレーザー光によって材料に損傷を与えることは知られていましたが、レーザー照射による原子空孔という原子レベルでの欠損に関する情報はよくわからないままでした。

（今回の研究内容）

そこで空孔の形成過程を調べていた北海道大学・日立製作所の研究チームは、ステンレス材料に 1-10 ナノメートル（nm：100 万分の 1mm）サイズのボイド（空孔集合体）が電子線照射やパルスレーザー照射により形成されていることを見出しました（1 頁目の写真参照）。その際、ナノボイド形成過程を北海道大学で独自開発したレーザー超高圧電子顕微鏡（130 万ボルト）（写真）を用いてレーザー照射しながら同時に観察実験することに成功し、ボイド形成は、導入された空孔が次第に集まって自己集合化によりレーザー照射下で起こっている現象であることを突き止めました。電子線照射とレーザー照射を単独で照射する以外にも、レーザー照射を行ってから電子線を照射したり、レーザーと電子線を同時に照射するなどの実験を繰り返し、理論計算とも比較した結果、初めてボイド形成の抑制メカニズムを解明することができました。また、電子線とレーザーの同時照射の方が電子線照射単独よりもボイド形成が抑制される【1+1<1】効果があることを突き止めました。

（研究手法）

ネオジウム・ヤグ（Nd:YAG）ナノ秒レーザー（ナノ秒は 10 億分の 1 秒：短時間パルス化レーザー光）を 130 万ボルト超高圧電子顕微鏡に敷設し、試料（316L ステンレス鋼）の上から直接照射する（ビーム径 2mm）と、レーザーの当たっているところにもボイドができることが原子レベルでわかりました。

(研究成果)

北海道大学が開発したレーザー超高圧電子顕微鏡により、レーザー照射をしながらナノレベルの小さな空孔集合体の成長過程を観察することに成功しました。さらに、レーザー照射により空孔が形成されていることを証明しました。

(今後への期待)

材料内に発生するボイドは、スエリングという材料の膨れ現象や、機械的強度の変化をもたらすため、ボイド発生を抑制するための解決が必要とされています。今回の研究成果により、宇宙環境で使用したり、放射線場などの過酷な環境で使用することを目的とした、高い信頼性を要求される材料の研究開発が、飛躍的に進むものと期待されます。

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院

超高圧電子顕微鏡研究室 教授 渡辺 精一 (わたなべ せいいち)

TEL: 011-706-7886 FAX: 011-706-7886 E-mail: sw004@eng.hokudai.ac.jp

ホームページ: <http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/HVEM/>

【語句説明】

*1 自己集合化 (Self-assembly)

自然と秩序だった構造が出来上がること、また、その過程。自発的秩序形成ともいう。

*2 超高圧電子顕微鏡

波長の短い電子線を利用した顕微鏡を電子顕微鏡と呼ぶ。電子顕微鏡は、電子線を走査し表面を観察する走査型電子顕微鏡、電子線が透過する薄い試料の内部の構造を解析する透過型電子顕微鏡があり、中でも100万ボルト(1MV)以上の高電圧を有する透過型電子顕微鏡を超高圧電子顕微鏡と呼ぶ。

一般的な電子顕微鏡と比較して、高い透過能を有することから、実物により近い厚い試料を観察・解析することが可能である。また、高加速電圧を利用した原子の弾き出しに関する点欠陥の研究、加熱したり破壊したりする材料・物質の動的な変化のその場観察等に活用できることに特徴がある。

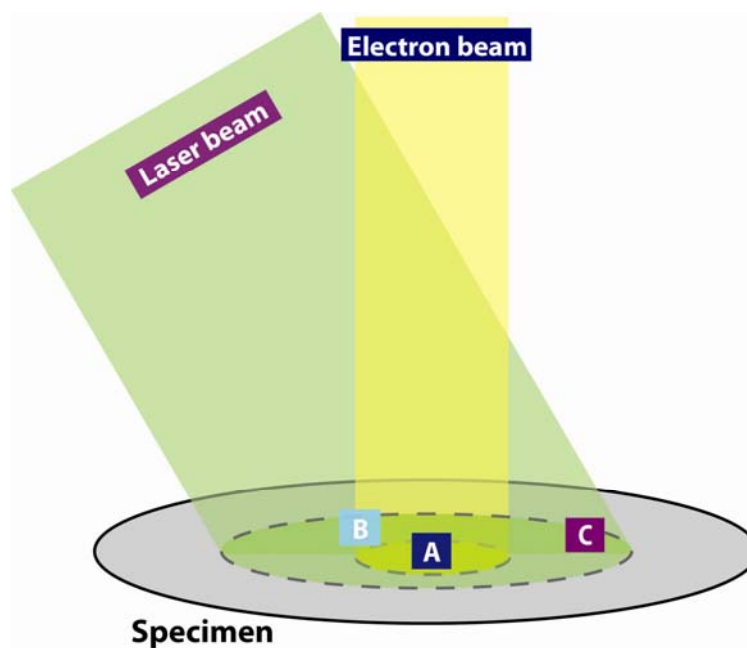
世界的にも日本は超高圧電子顕微鏡を利用した研究に秀でており、北海道大学は40年近い歴史がある。現在、文部科学省の超高圧電子顕微鏡連携ステーションを通じて国内外の共同研究を推進している。

*3 量子ビーム

粒子の性質と波の性質を持つ電磁波(X線, レーザー光)及び粒子線(中性子, イオン, 電子)の総称である。

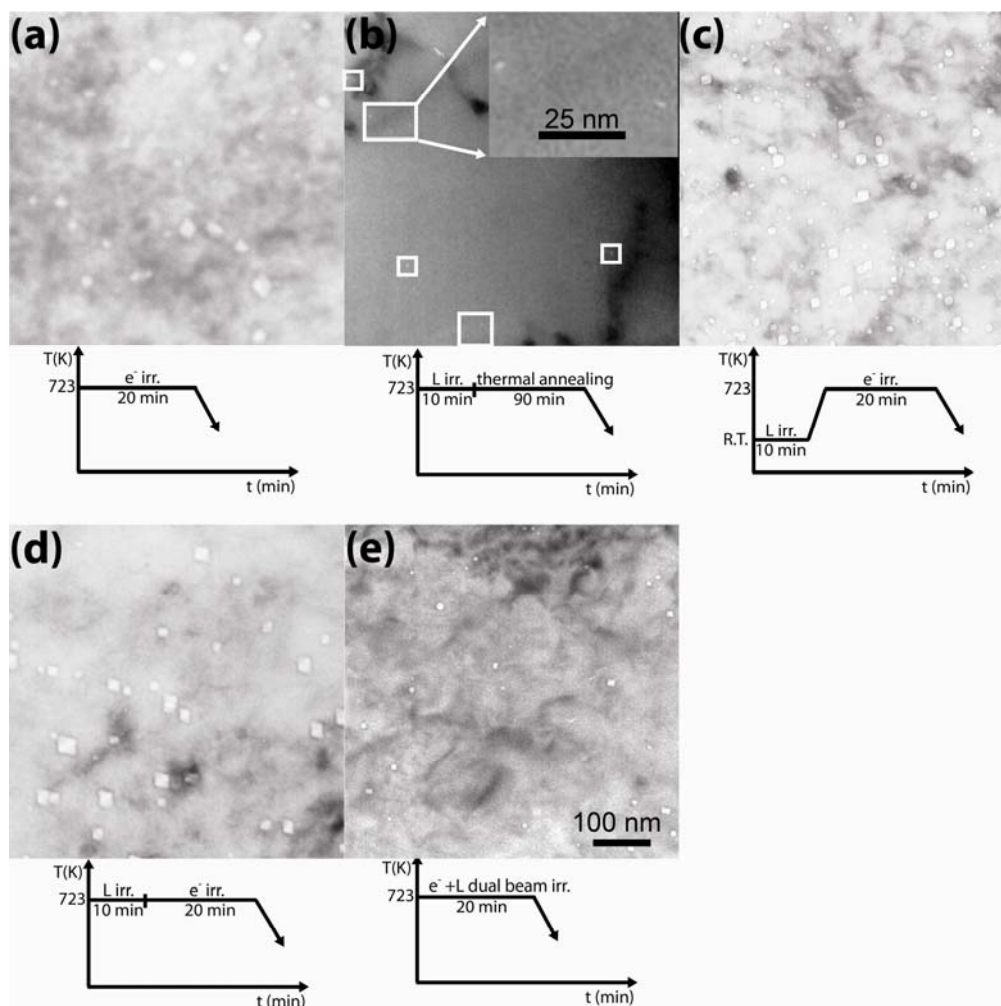
【参考図】

図 1



レーザー超高圧電子顕微鏡内でのレーザー・電子線同時照射実験の配置図（試料は直径 2mm）

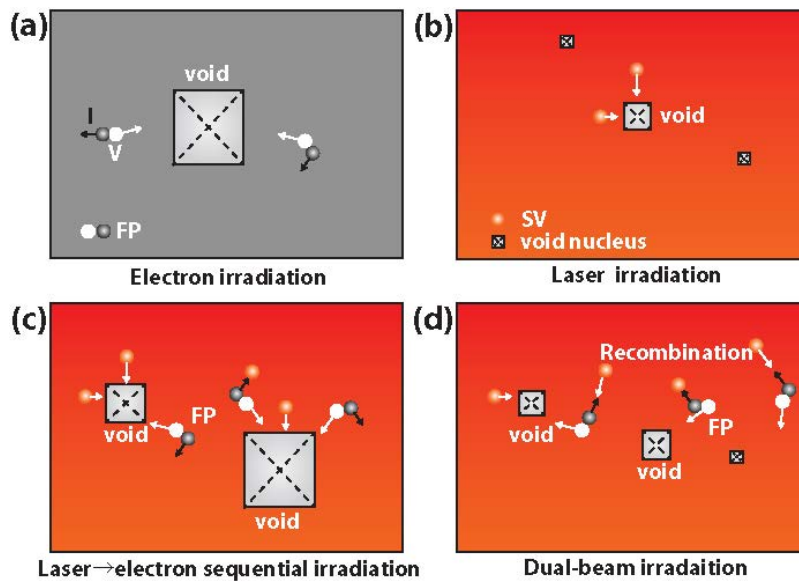
図 2



レーザー・電子線照射のポイド形成写真

- (a) 電子線のみ (b) レーザー照射のみ (c, d) レーザー照射の後に続いて電子線照射
 (e) レーザー・電子線同時照射：時間および温度は下図に記入（RT は室温）

図 3



レーザー・電子線照射のボイド抑制メカニズム

- (a) 電子線のみ
- (b) レーザー照射のみ
- (c) レーザー照射の後に続いて電子線照射
- (d) レーザー・電子線同時照射