



従来の定説とは異なるアルミニウムの真の破壊メカニズムを解明

概要

九州大学大学院工学研究院の戸田裕之主幹教授らの研究グループは、世界最大のシンクロトロン放射光施設SPring-8(※1)での4D観察(4Dとは、3Dに時間軸を加えたもの:3Dでの連続観察)を活用し、アルミニウムの真の破壊メカニズムを解明しました。一般に、金属は、内部に高密度に存在する微細な粒子がまず破壊し、それによってできた多数の空洞(ポイド)が徐々に成長し、最後にそれらのポイドが相互に連結することで破壊に至ります。しかし、SPring-8で得られた4D画像の解析により、アルミニウムの内部には非常に多くの微細なポア(水素が充填された球状の穴)がはじめから存在すること、材料に力が加わるとそれがそのまま成長して連結することで破壊を誘発することがわかりました。この真の破壊メカニズムに基づき材料を設計することで、自動車や航空機といった輸送機器などに用いられる構造用アルミニウムが飛躍的に高度化することが期待されます。本研究成果は、2013年10月4日に米国の学会誌『Metallurgical and Materials Transaction』誌にオンライン掲載されます。(本誌掲載は11/1予定)

背景

金属に力を加えた場合、金属は変形し、やがては破壊に至ります。その変形の過程では、金属材料内部に高密度に存在する微細な粒子がまず破壊し、次にそれによってできた多数の空洞(ポイド)が徐々に成長し、最後にそれらのポイドが相互に連結することで材料全体の破壊に至ります。このメカニズムは、すでに1948年に英国ケンブリッジ大学のTipper博士により発見され、以来多くの構造材料で様々な角度から検証され、すぐに定説として定着しました。今では、材料工学、機械工学のどの教科書にも載っている初等の専門知識と言っても過言ではありません。

ところで、戸田裕之主幹教授らの研究グループは、アルミニウムの内部には非常に多くの微細なポア(水素が充填された球状の穴:1立方ミリメートルあたり、数万個~数十万個)が存在することをシンクロトロン放射光を用いて明らかにしました。元々、アルミニウムには溶けきれない程の多量の水素が含まれており、これが材料中に微小なポアとなって出てくるというものでした。これは、アルミニウムを日々多量に製造している素材企業の技術者にとっても新鮮な驚きでした。研究グループは、アルミニウムが作られるプロセスでポアがどのように発生するののかも、最近、SPring-8を用いて明らかにしています(図1)。

内容

同研究グループは、一連の研究の中で、高密度に存在するポアがアルミニウムの破壊にも何らかの関与をしているのではないかという仮説を立て、これをSPring-8※1でのCT※2を利用した4D観察※3(図2)で確認しました。その結果、通常は破壊が生じない程度の小さな負荷の段階で、はじめから材料中に含まれる微細なポアが成長を開始してすぐに相互に連結し、その後、従来から知られている破壊メカニズムが補完的に働いて材料全体が破壊に至ることが分かりました(図3~5)。これは、SPring-8で得られた4D画像を見ることでもある程度確認できます。しかし、同研究グループは、4D画像を解析して破壊の引き金となった材料組織の欠陥を特定できる画像解析手法を新たに開発することで、これを証明することに成功しました(図6)。

この成果は、米国の学会誌『Metallurgical and Materials Transaction』誌に掲載が決定しています。(雑誌名: Metallurgical and Materials Transactions, 第44巻, 印刷中(11月1日発行予定の12月号に掲載予定))。

効果

アルミニウム材料は、自動車や航空機などの輸送用機器や建築、各種機械に広く使われています。これまでの学問や産業技術では、「背景」で記した破壊メカニズムを念頭に、金属材料内部に高密度に存

在する微細な粒子を除去したり、小さくしたりすることで強度などの特性を向上させようとしてきました。しかしながら、例えば航空機用のアルミニウムを例にとると、第二次世界大戦前後に開発された航空機用アルミニウムが未だに航空宇宙分野で多用されていたりします。これは、アルミニウムの強度がこの 70 年の間、ほとんど向上していないためです。

このたび明らかになった真の破壊メカニズムを念頭に置けば、アルミニウム中のポアを減らしたり、その空間的な配置を制御することで材料特性を向上させる技術を開発することが可能となります。これにより、何もレアアースのような特殊な添加元素や複雑で高コストの製造プロセスに頼らなくても、環境負荷の低減やコスト面での競争力を十分に担保しながら、高性能なアルミニウム材料が創製できる可能性があります。実際、研究グループは、この研究と平行し、アルミニウム作製時に水素が入らなくすることで微細なポアが大幅に削減され、その結果として強度や破壊靱性、成形性など、構造用材料にとって重要な各種特性を最大で数十%も向上できることを実証しています。

■今後の展開

我が国は、本年度から今後 10 年間にわたり、輸送機器の抜本的な軽量化に向けて、構造材料の高強度化を目指す研究開発（経済産業省プロジェクト：「革新的新構造材料等技術開発」）を大規模かつ強力に推進しようとしています。アルミニウムに関しては、本研究で得られた学術成果に基づき、九州大学と(株)UACJ※4 が中心となり、10 月より研究開発を開始します。(株)UACJ は、第二次世界大戦に際し、零戦に使われた「超々ジュラルミン」という高強度なアルミニウムを開発した企業として知られています。この国家プロジェクトでは、70 年ぶりにアルミニウムの強度特性を飛躍的に向上させ、『超々々』ジュラルミンとも言うべき傑出した材料を創製することを目指しています。これは、ひいては第二次世界大戦により壊滅した我が国の航空機産業の再興をも強力に後押しするものと期待されます。

■本研究について

本研究は、文部科学省の科学研究費補助金（基盤研究 A）「3D/4D マテリアルサイエンスのための新しい結晶方位イメージング手法の創製」（平成 20 年度～平成 23 年度）の成果です。

【お問い合わせ】

大学院工学研究院主幹教授 戸田裕之
(とだ ひろゆき)
電話：092-802-3246
FAX：092-802-0001
Mail：toda@mech.kyushu-u.ac.jp

【用語解説】

※1 SPring-8：播磨科学公園都市（兵庫県）にある世界最高性能の放射光を生み出すことができる大型放射光施設。放射光とは、電子を光速とほぼ等しい速度まで加速し、磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、超強力な電磁波のこと。SPring-8 では、放射光を用いてナノテクノロジー、バイオテクノロジーなど幅広い研究が行われている。

※2 CT：Computed Tomography（コンピュータ断層撮影法）の略語。病院では骨や臓器を 3D で観察するのに用いられる。一方、SPring-8 では金属材料の組織の 3D 観察が可能で、病院の CT 装置に比べて数百倍高い分解能での観察ができる。

※3 4D：四次元。3D（三次元）に時間軸を足したもの。4D 観察は、一眼レフカメラの連写の様に 3D 画像を連続的に取得すること。現実の物体は全て 3D であり、4D 観察ではその変化を克明に記録することができる。そのため、各種現象の理解や解明に非常に有効な手段となる。

※4 (株)UACJ：世界的な競争力を持つアルミニウムメジャーグループの形成を目指し、古河スカイ株式会社と住友軽金属工業株式会社が平成 25 年 10 月 1 日に合併して新たに発足した会社。

アルミニウムの製造プロセスでの微細なポアの変化

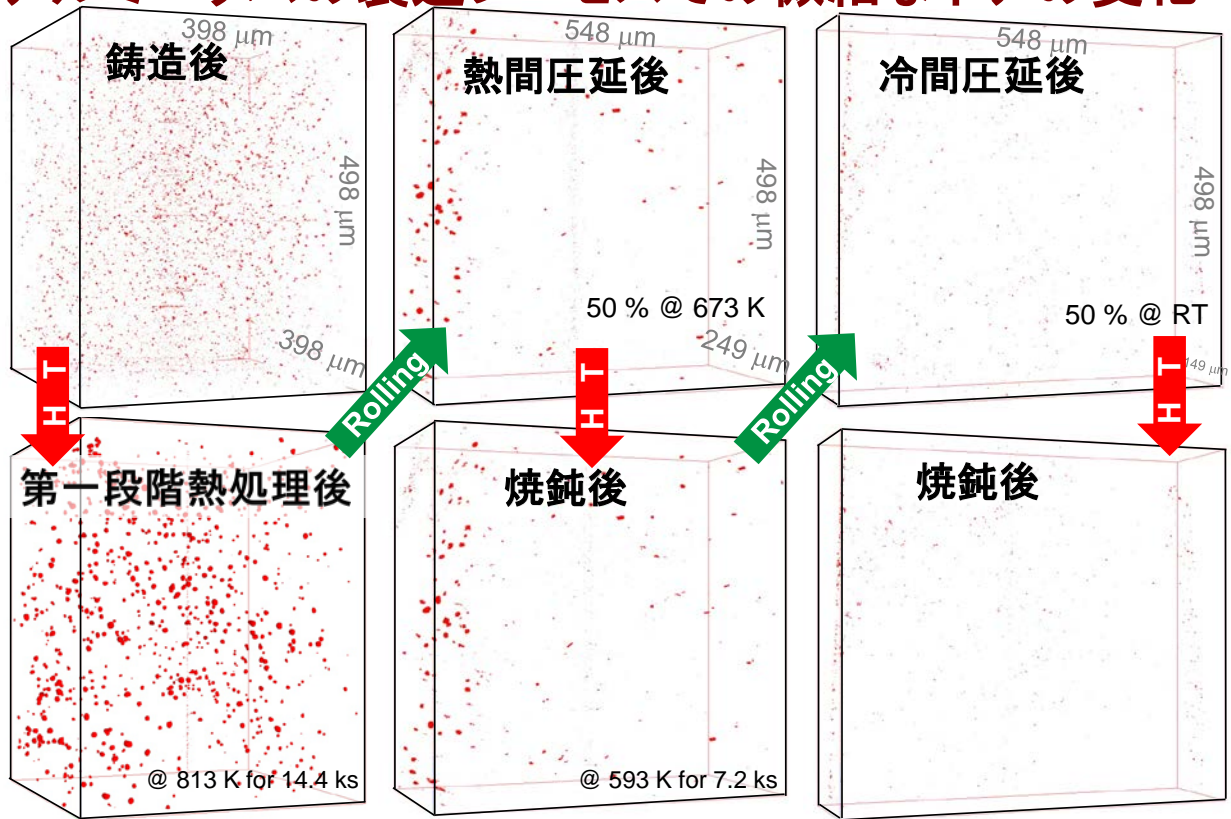


図1 アルミニウム製造プロセスの SPring-8 を用いた 4D 観察。非常に多くのポア (赤色) が铸造直後 (左上) から材料中に存在し、それが熱処理 (左下) により成長する。その後の加工プロセス (中央の上、および右上) である程度消滅、微細化するが、最終的にかなり多くの微細ポアが残存する (右下)。



図2 SPring-8 のイメージング用ビームライン BL20XU での実験風景

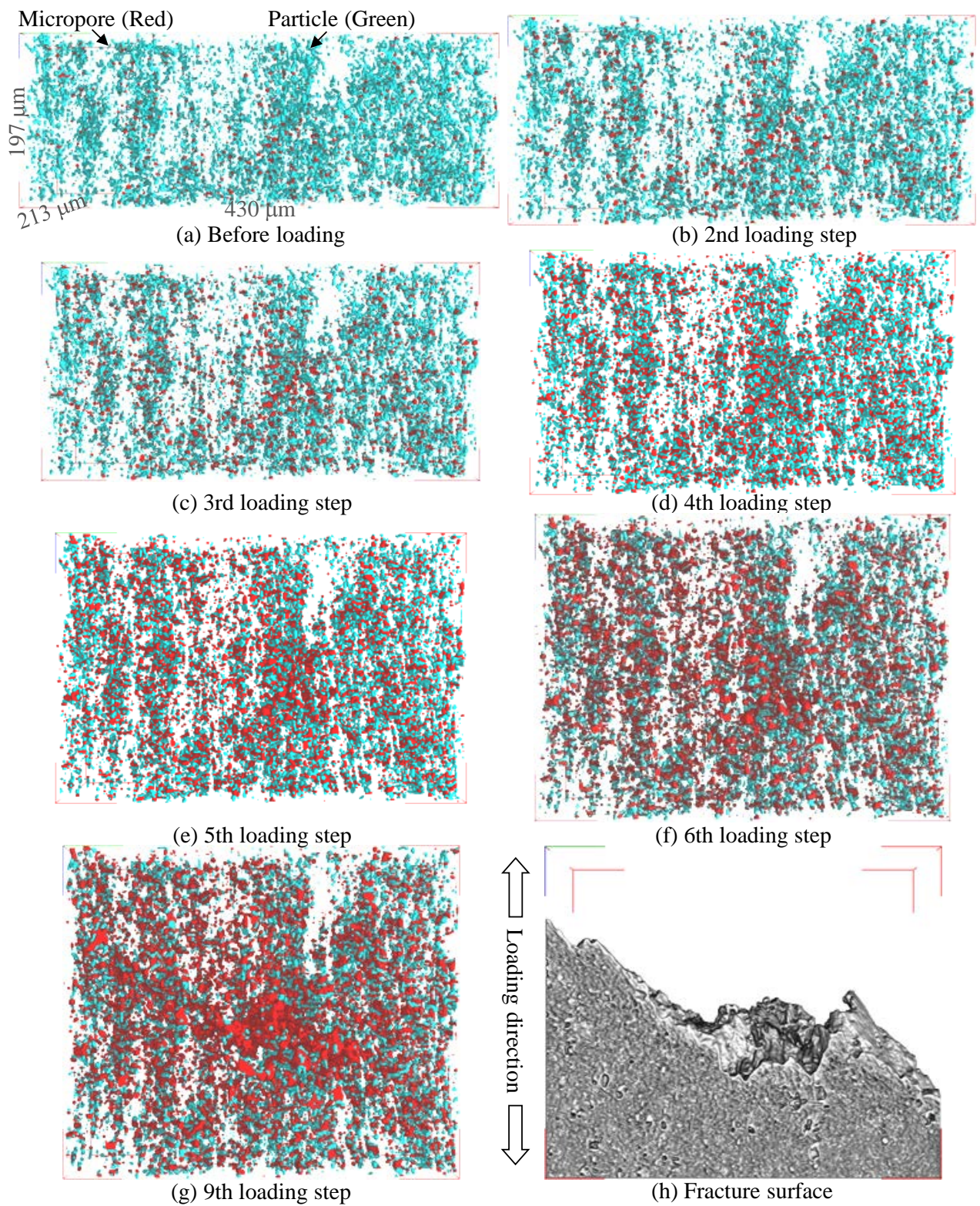


図3 航空機用アルミニウムの変形・破壊プロセスを SPring-8 で CT を利用して 4D 観察した結果。材料中に初めから高密度なポア（赤色）が存在し（a）、これが小さな負荷の段階から成長を開始し（b～g）、材料全体が破壊に至る（h）プロセスが示されている。

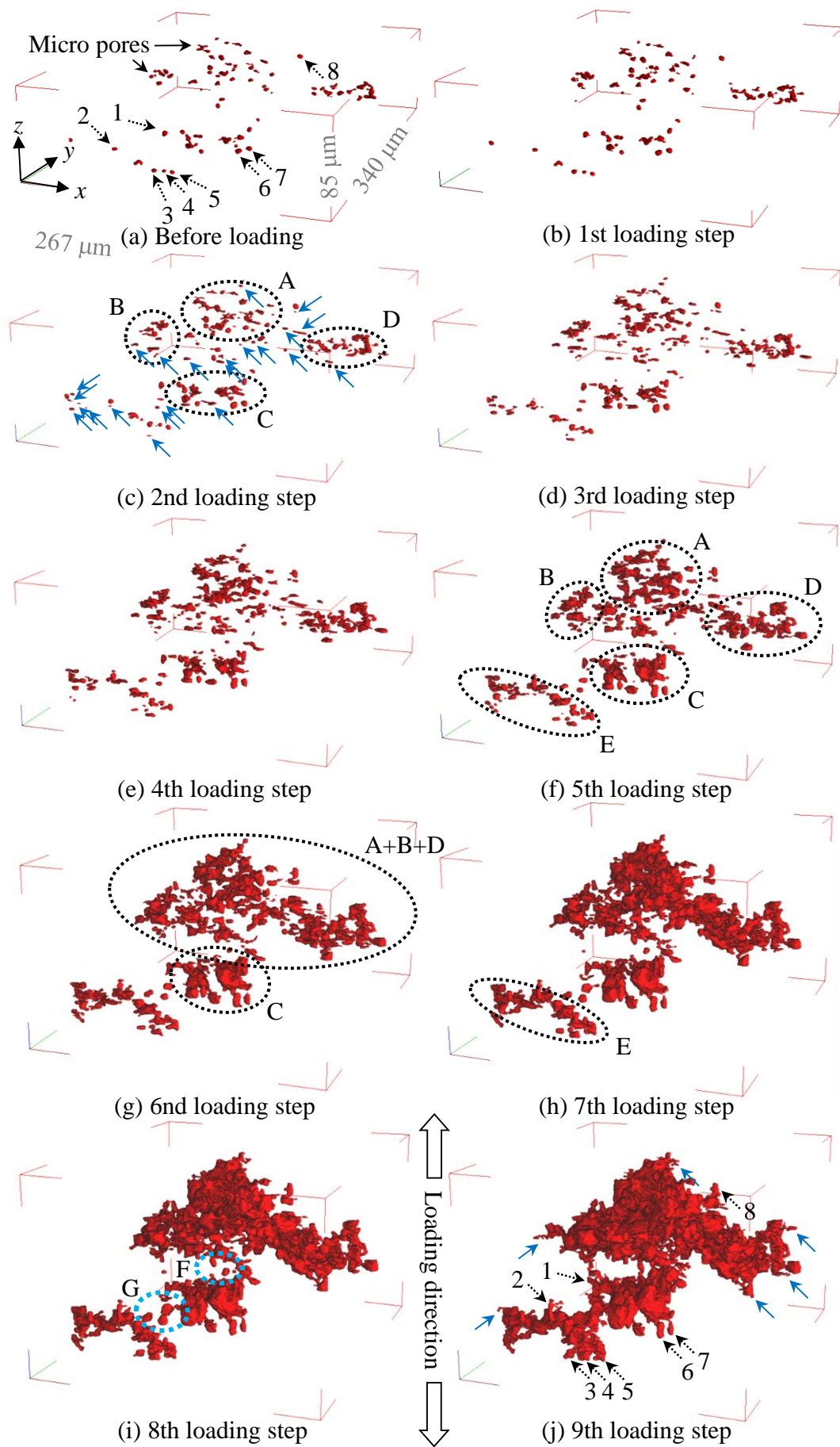


図4 図3の中で、材料中に初めから存在する高密度に存在するポア（赤色）のうち、材料全体の破壊に寄与したものだけを抽出した画像。微細なポアが早期に合体してき裂状になり、やがて破壊を誘発する。

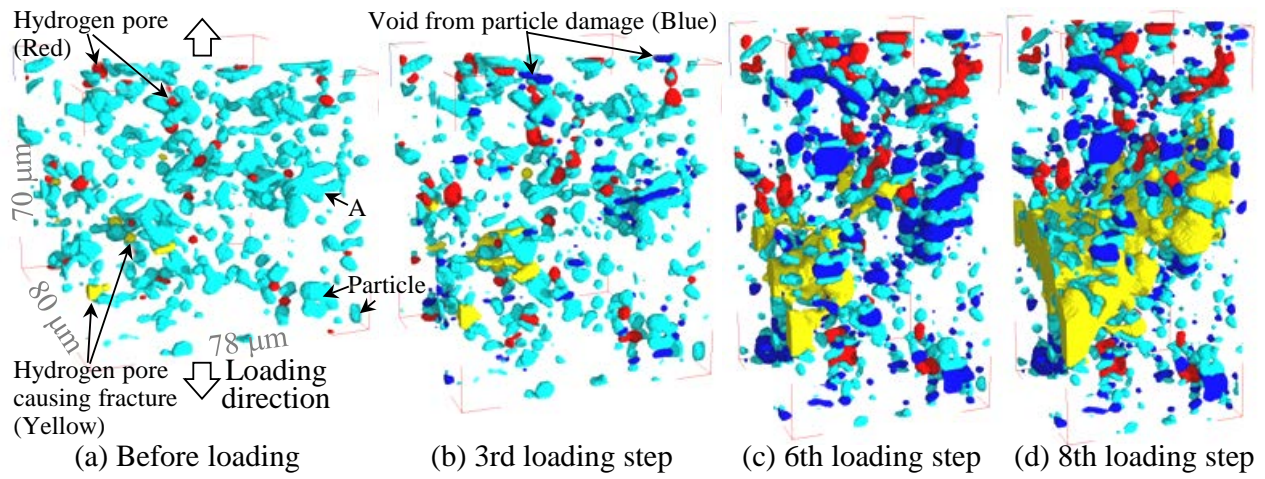
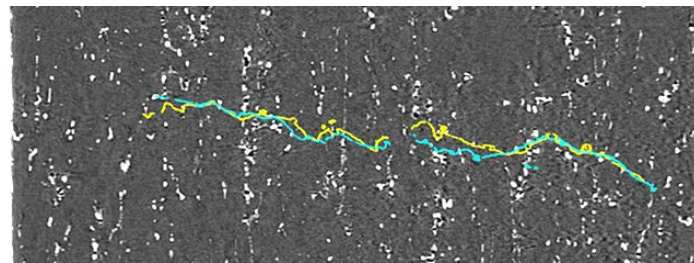
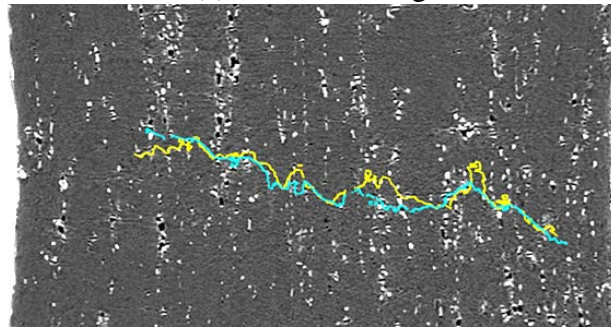


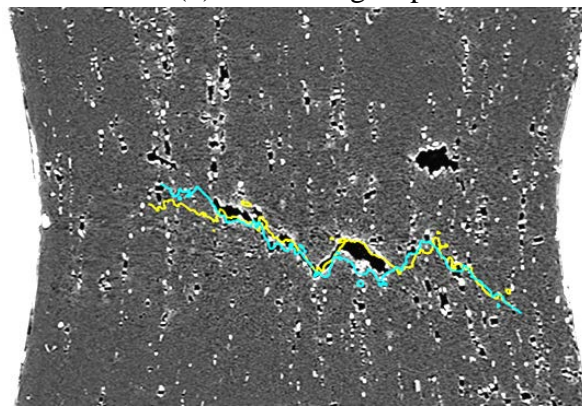
図 5 図 3 をさらに拡大したもの。ここでは、粒子は水色、材料中に初めから存在する高密度に存在するポアは赤色、そのうち材料全体の破壊に貢献したものを黄色、粒子が割れて発生した損傷を濃い青色で示している。粒子が割れて濃い青色の損傷が発生した(c)の段階では、すでに黄色のポアは合体してき裂状（黄色）になっており、材料全体の破壊を引き起こしかけている。



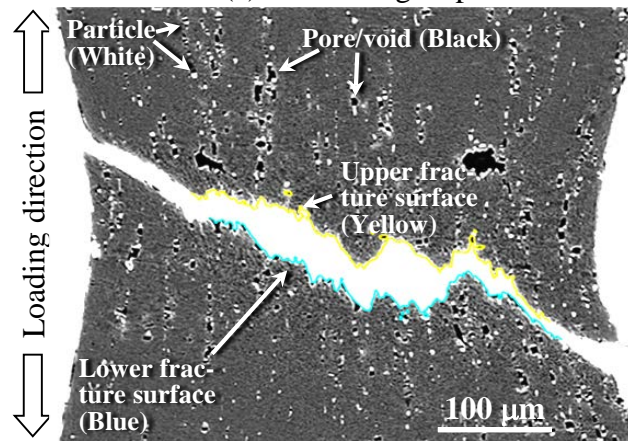
(a) Before loading



(b) 4th loading step



(c) 9th loading step



(d) Fracture surface

図6 破壊の引き金となった材料組織の欠陥を特定できる4D画像解析法を適用した例。上から順に、負荷をかける前(a)、負荷中の画像2枚(b,c)、そして破壊後の画像(d)。破壊後の画像から破断面(黄色と水色の線で表示)を抽出し、将来破壊するであろう位置を、破断した後の段階から、負荷をかける前の段階に向かい、時間を遡って順次予測する。これにより、負荷をかける前の画像中に見られる粒子や欠陥の内、どれが実際に破壊を引き起こしたのかを正確に特定できる。