

# QST 微細構造解析プラットフォームが提供する 放射光利用技術(量子科学技術研究開発機構)

片山 芳則<sup>1)</sup> 高橋 正光<sup>\*\*</sup> 佐々木 拓生<sup>2)</sup>  
綿貫 徹<sup>3)</sup> 町田 晃彦<sup>4)</sup> 齋藤 寛之<sup>4)</sup>

## 1. はじめに

兵庫県にある大型放射光施設 SPring-8 では、高いエネルギー(短い波長)の強力な X 線を利用できる<sup>(1)</sup>。2016年4月1日に発足した量子科学技術研究開発機構(量研/QST)は SPring-8 に2本の専用ビームラインを設置し、放射光利用技術の開発を行うとともに、微細構造解析プラットフォームの一員として、その技術を広く産官学の研究者に提供している<sup>(2)</sup>。表1に QST 微細構造解析プラットフォームの登録装置を示す。日本原子力研究開発機構(JAEA)の一部が移管されて発足した経緯から、一部の装置は JAEA の専用ビームライン BL22XU に設置されている。これらの登録装置では、特色ある先端的な計測が可能となっている<sup>(3)</sup>。

以下の節では、表面 X 線回折計、ダイヤモンドアンビルセル回折計、高温高圧プレス装置の3つの装置について、

表1 QST 微細構造解析プラットフォームの登録装置。

BL11XU(QST ビームライン)
放射光メスbauer分光装置
共鳴非弾性 X 線散乱装置
表面 X 線回折計
BL14B1(QST ビームライン)
高温高圧プレス装置
BL22XU(JAEA ビームライン)
ダイヤモンドアンビルセル回折計
大型 X 線回折計

その概要と支援例を紹介する。ここでは、それ以外の装置について簡単に説明しておく。

放射光メスbauer分光装置は、核ブラッグ分光器を備え、鉄を対象に RI 線源による測定と同様なドップラー効果を利用したメスbauerスペクトルを測定することできる。全反射法を用いた薄膜試料、さらには鉄の同位体置換を利用した原子層1層毎の観察など、磁性・スピントロニクス材料に応用可能な測定が可能である<sup>(4)(5)</sup>。

共鳴非弾性 X 線散乱装置は、入射 X 線のエネルギーと散乱された X 線のエネルギーの違いを測定できる。高温超伝導体における電子励起の解明など、物性物理の分野で活用される手法であるが<sup>(6)</sup>、現在では、装置の特色を活かして高分解能 X 線吸収分光測定などにも使われている。この手法は、燃料電池の白金ナノ粒子のオペランド観察に活用された<sup>(7)</sup>。

大型 X 線回折計は、共鳴 X 線回折による物性研究、応力・ひずみ測定、コヒーレント X 線を利用したメゾスケールの構造解析など多目的に用いられてきた。2019年度に移設が予定されており、2020年度からは、限られた手法の利用が再開される見込みである。

## 2. 表面 X 線回折計による量子構造観察

表面 X 線回折計は、半導体の原子層レベルの結晶成長過程をリアルタイムで観察することを目的に、分子線エピタキシー(MBE)装置と X 線回折計を一体として組み合わせた複

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門(〒679-5148 佐用郡佐用町光都 1-1-1)

\* 関西光科学研究所 放射光科学研究センター; 1)センター長 2)主幹研究員 3)次長 4)上席研究員

\*\* 次世代放射光施設整備開発センター: グループリダー

Synchrotron Radiation-Based Techniques Available at QST Advanced Characterization Nanotechnology Platform (National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology); Yoshinori Katayama, Masamitsu Takahashi, Takuo Sasaki, Tetsu Watanuki, Akihiko Machida, Hiroyuki Saitoh(Quantum Beam Science Research Directorate, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Sayo-gun, Hyogo)

Keywords: X-ray diffraction, synchrotron radiation, crystal growth, molecular beam epitaxy, pair distribution function, charge glass, high pressure, high temperature, in-situ observation

2019年7月31日受理[doi:10.2320/materia.58.770]

合システムである<sup>(8)-(10)</sup>。MBE装置としては、GaAs系用とGaN系用の2台があり、回折計に載せ替えることでそれぞれの材料の測定を行うことができる。X線回折計は4軸で試料を回転し、2軸で検出器の位置を調整するいわゆる4S+2D型である。

ある結晶の上に別の結晶の薄膜を、結晶面をそろえて成長(エピタキシャル成長)させることは半導体デバイスの作成で重要なプロセスである。しかし、結晶の格子定数が違う場合、ひずみや欠陥が発生する。良質な薄膜を作るためには、これらをコントロールする作成条件を見出さなければならない。そのためには、半導体の結晶成長をリアルタイムで観察する手法が有用である。一般的に使われているRHEEDは結晶成長初期の表面構造や表面の凹凸など表面に敏感である。しかし、結晶内部の状態を見ることが難しいことに加え、プローブである電子線と物質との相互作用が強いため、多重散乱効果の影響で定量的な解析が難しいといった問題点がある。その点、X線は、物質との相互作用が比較的に弱いので、試料の内部を観察することができるとともに、定量的な解析ができる利点がある。

本装置の担当者である高橋と佐々木は、結晶ひずみや結晶性を評価できるX線回折の逆格子マッピングという手法に注目し、この手法による結晶成長のその場観察を実現した<sup>(11)</sup>。基板の上に薄膜を成長させる場合、格子定数が異なると回折条件を満たすX線の入射角と出射角の両方がずれる。さらに、格子にひずみがある場合にはスポット自体が広がりを持つようになる。このような情報を得るためには、試料と検出器の両方を角度スキャンして注目する回折スポットの周りの回折X線強度分布を測定する逆格子マッピングが必要となる。強力な放射光の利用と2次元検出器の利用等の測定上の工夫により、現在ではある回折スポットの周りの逆格子マッピングを10秒以下で測定できる。MBEによる結晶の成長速度と比較した場合、これは原子層レベルでの観察ができることを意味する。この手法を用いて、GaNの結晶成長初期の特異な緩和過程、InGaAs/GaAsのひずみ緩和過程や、太陽電池を想定した多層構造などが研究されている。本装置の詳細とこれら薄膜の成果については、高橋と佐々木の解説<sup>(8)-(10)</sup>に譲ることとして、本解説では、豊田工業大学

の神谷教授のグループによって行われた量子ドットにキャップ層を成長させたときの量子ドットのひずみの変化を調べた研究について紹介する<sup>(12)</sup>。

量子ドットや量子ワイヤは光電デバイスへの応用が期待されることから、多くの研究が行われている。中でも自己組織化によってGaAs基板上に作成されるInAs量子ドットは、近赤外域の発光素子として研究が行われている。InAs量子ドットにGaAsあるいはGaInAsのキャップ層を付けるとフォトルミネッセンスの波長が変化する。この変化は、キャップ層による量子ドット中のひずみの変化と関連づけられて議論されてきたが、これまで、それを直接観測した研究はなかった。そのため、本装置を用いて、MBEによりキャップ層を成長させたときの量子ドットのひずみの変化のその場観察が行われた。

実験にはエネルギー10 keVのX線を使い、入射角 $0.2^\circ$ という非常に小さな角度で試料に入射した。全反射の臨界角付近でX線を入射すると、反射する成分と屈折する成分に分かれる。屈折した成分は試料表面のごく浅い部分を進む。よって、表面に垂直な格子面で回折がおき、回折条件を満たす角度で、小さな出射角で回折X線が観測される。通常の対称反射を利用したX線回折では、表面に平行な格子面の間隔を調べることになるが、この微小角入射X線回折法では、表面ごく近傍で表面に垂直な格子面の間隔を調べることができる。実験では、GaAsの001面の上にInAsの量子ドットを作成した試料の上にGaAsのキャップ層を成長させていきながら測定が行われた。このときCCD検出器によって220回折スポット付近で観測されたイメージを図1に示す。(a)はキャッピングを行う前、(b)から(d)はそれぞれ、(b)6 nm、(c)12 nm、(d)20 nmのキャップ層を付けたときのイメージである。縦軸はバルクのGaAsの格子定数で規格化された $[110]$ 方向の格子定数を示す。バルクのInAsではこの値は1.072となる。横軸は、全反射の臨界角で規格化された出射角である。成長前にはX線強度は広い範囲に広がっているが、成長が始まると規格化された格子定数が大きな部分の強度が顕著に減少していることがわかる。この研究では、縦軸を0.01ごとに区切り、その区間でX線強度を積分した値が成長とともにどのように変化していくかが調べられた。

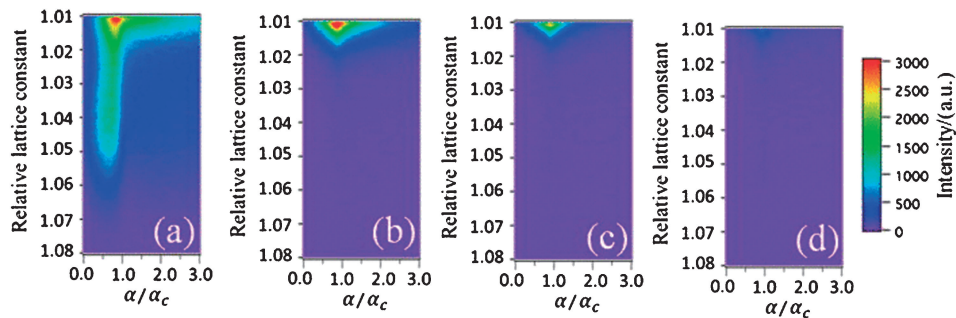


図1 InAs量子ドットにGaAsキャップ層を成長させたときの220回折スポット付近のX線回折イメージ。(a)成長前、(b)6 nm、(c)12 nm、(d)30 nm厚。Reprinted with permission from K. Shimomura, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **118**(2015), 185303. Copyright 2015 American Institute of Physics. (オンラインカラー)

キャップ層成長の初期では、規格化された格子定数が1.01から1.03の範囲では強度が増加したのに対し、1.04以上の強度は減少した。さらにキャップ層を成長させるとすべての範囲で強度が減少するようになり、キャップ層が4 nm になったところで、減少の割合が緩やかになった。これは量子ドットの平均の高さと同程度であり、量子ドットがキャップ層によっておおわれたことを示唆している。

上記の結果から、キャップ層が成長する過程でのInAs量子ドットとキャップ層の構造について考察が行われた。キャップ層の成長前は、X線強度の広い分布が示すように、量子ドットの格子がGaAsに近い場所では圧縮される一方、ドットの頂点に行くに従い次第にひずみが小さくなっていくと考えられる。キャップ層の成長の初期では、前述のように規格化された格子定数が1.01から1.03の範囲の回折強度が増加する一方、1.04以上の強度は減少する。これは、InAs量子ドットの格子がキャップ層によって圧縮される一方、キャップ層のGaAsの格子は引き延ばされるため、ある範囲の格子定数の強度が増えたのだと考えられる。さらにキャップ層が成長すると、量子ドットの間が埋まっていき、量子ドットを圧縮するため規格化された格子定数のすべての領域でX線強度が減少する。すなわち量子ドットのひずみが大きくなる。ここでは紹介できなかったキャップ層の組成を変えた測定や、キャップ層の組成を途中で変えた測定によって、InとGaの相互混合が起きていることも示唆された。これらの結果は、キャップ層の構造が量子ドットのひずみや組成分布にどのような影響を及ぼすか示すものであり、量子ドットの発光特性の制御に向けて有益な情報を与えるものである。

### 3. ダイヤモンドアンビルセル回折計による原子2体分布関数解析

本装置の名称に使われているダイヤモンドアンビルセル(DAC)は、超高压発生のための小型の装置である。2個の単結晶ダイヤモンドにガスカートと呼ばれる金属片を挟み、両側から力を加えることによって数GPaから数十GPaの超高压力を発生させることができる。先端の形状を工夫したダイヤモンドを用いることにより100 GPaを超える圧力も実現されている。試料はこの金属片にあけた数百から数十 $\mu\text{m}$ 程度の小さな穴の中に封入され、金属片とともにダイヤモンドにより加圧される。一般に、DACを用いた高压下の結晶構造解析には粉末X線回折法が使われることが多いが、本装置は、高压下の単結晶X線回折実験もできるよう工夫されている。最近の高压下測定の支援例としては、物理的圧力と化学的圧力(原子半径の違う同族元素の置換による効果)の組み合わせにより鉄系超伝導体で新しい超伝導相が出現することを、純良な単結晶を用いた実験により結晶構造の観点から検証した成果が挙げられる<sup>(13)</sup>。

本装置は、400 mm  $\times$  400 mm という大型の2次元検出器(読み取り装置付きのイメージングプレートおよび大型フラットパネル検出器)を備えている。さらにビームライン

BL22XUには通常の分光器の他に高エネルギー用の分光器が設置されており、70 keV(波長0.177 Å(0.0177 nm))までの高エネルギーの強力な単色X線を使うことができる。この二つを組み合わせることによって、本装置は高压下の測定だけでなく、原子2体分布関数(pair distribution function, PDF)法に適した回折データを迅速に測定することにも活用されている。

PDF法は、もともとガラスや液体など構造が不規則な系で用いられてきた手法であるが、結晶においても、局所構造を調べる手法として注目されている。通常のX線結晶構造解析では、同じ単位胞が3次元的に積み重なった理想的な結晶を前提とする。しかし、現実の結晶では、局所構造のひずみや、長距離まで発達しない短距離の秩序など、平均構造からのずれが存在し、さらにそれがその物質の性質に大きな影響を及ぼしている場合がある。PDFは、実空間において、ある原子から距離 $r$ のところにとりだす他の原子が存在するかを示す関数であり、これによって、一般のX線結晶構造解析ではとらえることが困難な平均構造からのずれを調べることができる。PDFは回折線だけでなく散漫散乱も含んだ粉末X線の全散乱データをフーリエ変換することによって得られる。実空間の分解能はデータの散乱ベクトルの大きさ $Q$ の上限で決まるので、強力な高エネルギー(短波長)X線の利用と大型検出器による高い回折角までの高精度な測定は大きなメリットとなる。

本装置を用いたPDF解析は産業技術総合研究所のKim主任研究員らによる水素貯蔵材料の研究から開始された<sup>(14)</sup>。ここでは、本手法によって、鉛系ペロブスカイト酸化物であるクロム酸鉛 $\text{PbCrO}_3$ が「電荷ガラス」という特異な状態となっていることを解明した東京工業大学、東教授のグループのYuらの研究を紹介する<sup>(15)</sup>。 $\text{PbCrO}_3$ は古くから知られている物質で、平均的な結晶構造としてはAサイトにPb、Aサイトが作る立方体の体心の位置にあるBサイトにCr、同じく面心の位置にOが存在する。Pbは価数として2価と4価をとり得るが、この化合物では同じ構造をとる $\text{CaCrO}_3$ や $\text{SrCrO}_3$ のように $\text{Pb}^{2+}\text{Cr}^{4+}\text{O}_3$ と2価のイオンとなっていると長らく考えられていた。しかし、同じ結晶構造を持つ $\text{SrCrO}_3$ と比較した場合、 $\text{SrCrO}_3$ が金属的なのに対し $\text{PbCrO}_3$ が絶縁体的であることや、 $\text{Sr}^{2+}$ と $\text{Pb}^{2+}$ が同様のイオン半径を持つのに $\text{PbCrO}_3$ の格子定数が5%近く大きいことの原因が不明であった。さらに近年、高压下で大きな体積収縮を伴う同型転移、すなわち、同じ立方晶から立方晶への相転移が発見された。また、構造の面からは、X線や中性子回折のブラッグピークがブロードで、何らかの欠陥構造の存在が示唆されていた。実際、高分解能透過電子顕微鏡によって原子間距離の変調が観測されたが、これまで提案されたPb欠損のモデルでは、他の現象を統一的に説明することができなかった。このような背景のもと、 $\text{PbCrO}_3$ の構造および電子状態を解明するために、様々な手法を駆使した研究が行われた<sup>(15)</sup>。

まず、粉末X線回折実験により、高温高压合成法で作成

された試料が不純物を含まず、立方晶であることが確かめられた。さらに、3倍周期の変調構造の位置に散漫散乱が観測されるとともに、リートベルト法による解析では、Pbの原子変位因子が異常に大きいことがわかった。一方、硬X線光電子分光からPb<sup>2+</sup>とPb<sup>4+</sup>が共存していることが明らかになった。更に並行して行われたPDF解析によって、Pbの短距離構造が解明された。図2に本装置で測定されたX線全散乱データから得られたPDFと構造モデルから計算したPDFとを比較した図を示す。一番上のPbが立方体の単位胞の中心に存在するモデルでは、実験データを再現できていないことがわかる。一方、Pbの位置を立方体の中心から110方向に等価な12の方向にランダムに0.44 Å(0.044 nm)だけずらしたモデルでは、測定データとの一致が格段に良くなった。しかし、まだ12 Å(1.2 nm)以下の領域で不一致が残っていた。12 Å(1.2 nm)は格子定数 $a_0=4.0$  Å(0.4 nm)の3倍である。そこで、 $3a_0 \times 3a_0 \times 3a_0$ の格子を考え、その中でPb<sup>2+</sup>とPb<sup>4+</sup>が岩塩構造をとるように配置し、Pb原子の $x, y, z$ 座標のそれぞれに対しサイン型の縦波の変位を仮定し、実験値を再現するように周期と位相をフィットした。その結果を下段に示す。実験結果との一致が非常によくなったこと

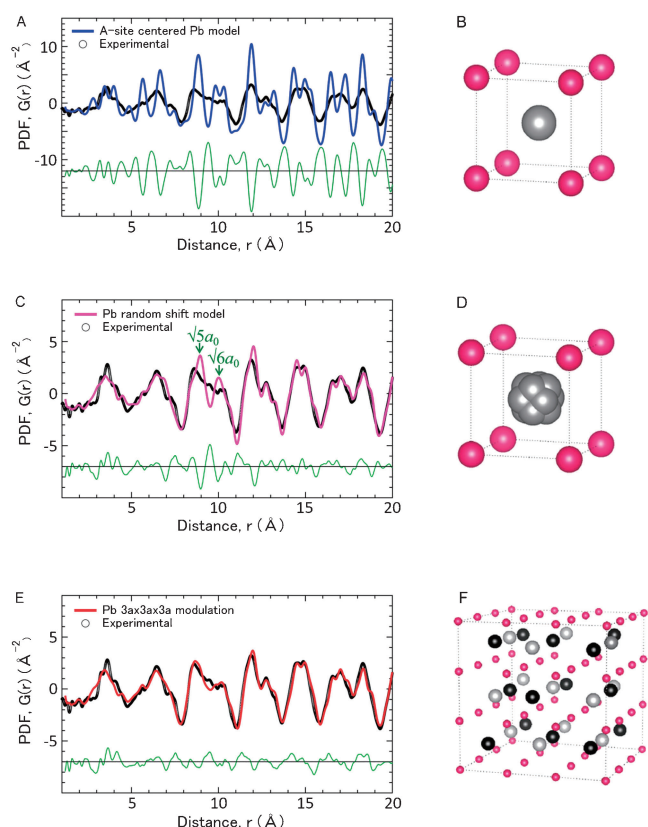


図2 クロム酸鉛 PbCrO<sub>3</sub> の原子 2 体分布関数 PDF の実験結果とモデル計算の結果の比較および残差。右側にモデルを示す。大きな丸は鉛、小さな丸はクロムを表す。酸素は省略されている。Reprinted with permission from R. Yu, *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **137**(2015), 12719. Copyright 2015 American Chemical Society. (オンラインカラー)

が見て取れる。このほかに、様々なモデルを試したが、このモデルが最も良い一致を示した。27個の単位胞を含むこの超構造は、Pb<sup>2+</sup>とPb<sup>4+</sup>が同数入ることができない。また、隣の超構造との界面にA-AあるいはB-Bの配置ができる。これらの理由で、この超構造は長距離に成長することができない。上記の結果から、クロム酸鉛の価数分布はPb<sup>2+</sup><sub>0.5</sub>Pb<sup>4+</sup><sub>0.5</sub>Cr<sup>3+</sup>O<sub>3</sub>であり、電荷の分布が不規則な「電荷ガラス」という状態になっていることが結論づけられた。このPDF解析については、本装置の担当者の一人である綿貫の解説に詳しい<sup>(16)</sup>。

#### 4. 高温高压プレス装置と高温高压合成

高温高压プレス装置は、10 GPa(約10万気圧)までの圧力、1000°Cを超える温度を発生することができる装置である。キュービックマルチアンビル型という方法を採用し、立方体形状の固体の圧力媒体を、先端に正方形の平面を持つ超硬合金製のピストンで6方向から等方的に圧縮することで圧力媒体中の試料に超高压を発生させる。立方体圧力媒体の面の大きさは、ピストン先端の平面より大きいため、圧縮に伴い圧力媒体が変形してピストンとピストンの間の隙間に入り、ピストンとの摩擦によって中身が封じ込まれる。このピストンとピストンの間の狭い隙間を通して、放射光X線を入射するとともに、試料からの回折X線あるいは透過X線を取り出す。

試料は圧力媒体や容器あるいは加熱のためのヒーター材などに包まれているが、物質を透過する能力が高い高エネルギーX線を用いることで内部の観察が可能となる。さらに、粉末X線回折を測定する方法として、偏向電磁石から発生する連続的にエネルギーが分布するX線(白色X線)を試料に入射し、検出器としてエネルギー分解能を持つゲルマニウム半導体検出器を用いて測定する、いわゆるエネルギー分散型が採用されている。これによって、高温高压下であっても数十秒といった短時間で粉末X線回折測定を行うことが可能である。

本装置は、結晶の圧力誘起構造相転移や、液体やガラスの構造変化の研究に使われてきたが、最近では、主に物質の高温高压合成条件の効率的な探査のために活用されている。高温高压合成法は、ダイヤモンドなど超硬物質の合成だけでなく、常圧では合成が困難な様々な物質を得るための強力な手法である。しかし、合成条件を見出すためには、一般に、温度や圧力、反応時間などを変えて実験を行い、常温常圧下に回収した試料を分析・評価するという作業を繰り返すことが必要となる。そのため新規物質探査への応用は、まだ限られているのが現状である。それに対し、放射光を使ったその場観察手法を用いると、高温高压下で試料の構造変化や反応を観察しながら目的の物質を合成することが可能になり、合成条件を効率的に見出すことができる。ここでは、東北大学の折茂教授らのグループが行ったペロブスカイト型の水素化物合成のその場観察の例を紹介する<sup>(17)(18)</sup>。



化学式  $ABX_3$  で表されるペロブスカイト化合物は様々な分野で重要な研究対象となっている。これは、強誘電体、銅酸化物高温超伝導体、さらには新しい太陽電池など優れた性質を示す材料がペロブスカイト構造あるいはそれを基礎とした構造を持つためである。一方、ペロブスカイト構造を持つ水素化物の報告例は少なかった。水素を多く含む化合物は優れた特性、例えば高い温度での超伝導を示す可能性があることから、ペロブスカイト構造を持つ水素化物の探査は、その候補となる物質を増やすという観点から大きな意義がある。金属的な性質を持ち、水素量が多い化合物として、これまで報告例がないアルカリ金属と遷移金属からなるペロブスカイト型水素化物の合成に向け、第一原理計算が高木らによって行われた<sup>(17)</sup>。それにより、中でも  $LiNiH_3$  が熱力学的に安定であること、リチウムの水素化物  $LiH$  と  $Ni$  の混合物を水素化させた場合、 $LiNiH_3$  に向けた反応が起こりうることなどが予測された。これらの予測を元に、佐藤らが高温高压合成に取り組んだ<sup>(18)</sup>。出発物質として、 $LiH$  と  $Ni$  を用い、高温で水素を発生する水素源とともに試料容器に入れ、圧力 3 GPa まで加圧した。その後、600°C まで加熱し、水素流体中に保持しながら、水素化反応の放射光 X 線によるその場観察を行った。図 3 に粉末 X 線回折プロファイルの時間変化

を示す。エネルギー分散法を用いているため、横軸は X 線のエネルギーである。測定時間は 1 分で、10 分ごとのプロファイルがプロットされている。600°C に到達直後には、fcc 構造の  $Ni$  からのブラッグピークが観察された。一方、軽元素からなる  $LiH$  の回折線は非常に弱いため観察されていない。時間がたつにつれて、 $Ni$  からの回折線が低エネルギー側にシフトしていく。これは、 $Ni$  が作る結晶格子が次第に膨張していることを示しており、水素が  $Ni$  に侵入して  $Ni$  と水素の固溶体  $NiH_x$  ができていることを示している。15 分を経過したところから、 $NiH_x$  の回折線の低エネルギー側に別の fcc 構造からの回折線が観察され始めた。時間の経過とともに、この回折線は低エネルギーにシフトするとともに、強度を増していった。この回折線は  $Li$  と  $Ni$  の固溶体合金の水素化物、 $Li_yNi_{1-y}H$  の生成を示すものと考えられる。70 分後には、全く新しい回折線が観察され始めた。これらの回折線は単純立方格子で指数付けが可能であり、 $LiNiH_3$  の生成を示すものである。250 分後にはほぼ  $LiNiH_3$  の単相となった。この相は、常温常圧に回収可能であった。その格子定数は、 $a = 3.266 \text{ \AA}$  (0.3266 nm) と理論予想の値  $a = 3.25 \text{ \AA}$  (0.325 nm) と非常に良い一致を示し、 $LiNiH_3$  の生成が裏付けられた。

これらの変化から、以下のような、3 段階の生成機構が考えられる。ステップ I では水素のみの拡散が起き、ステップ II では  $Li$  と  $Ni$  の相互拡散が、ステップ III では、 $Li$  と  $Ni$  の秩序化が結晶格子の変形とともに起きていると考えられる。その場観察によって本試料の合成条件が明らかになっただけでなく、生成機構が解明されたことで、類似の組成を持つ新しい水素化物の合成に向けた指針も得ることができた。本装置ならびに水素化物合成の詳細については、本装置の担当者である齋藤による解説を参照していただきたい<sup>(19)(20)</sup>。

## 5. ま と め

QST 微細構造解析プラットフォームでは、上記のように材料開発への応用を目指して開発された特色ある放射光利用技術を提供している。SPring-8 の運転に合わせて、定期募集は毎年 5 月と 11 月に行っているが、利用相談は随時受け付けている。こんな測定はできないだろうか、というご質問があれば、ぜひお気軽にお問合せいただきたい<sup>(2)</sup>。

## 文 献

- (1) <http://www.spring8.or.jp/ja/>
- (2) <http://www.kansai.qst.go.jp/nano/>
- (3) 片山芳則：金属，**86**(2016)，1091-1096。
- (4) 三井隆也，瀬戸 誠：放射光，**25**(2012)，166-175。
- (5) T. Mistui, K. Mibu, M. Seto, M. Kurokuzu, S. P. Pati, T. Nozaki and M. Sahashi: J. Phys. Soc. Jpn., **85**(2016)，063601。
- (6) 石井賢司：固体物理，**51**(2016)，79-92。
- (7) Y.-T. Cui, Y. Harada, H. Niwa, T. Hatanaka, N. Nakamura, M. Ando, T. Yoshida, K. Ishii, D. Matsumura, H. Oji, H. Ofuchi and M. Oshima: Sci. Rep., **7**(2017)，1482。

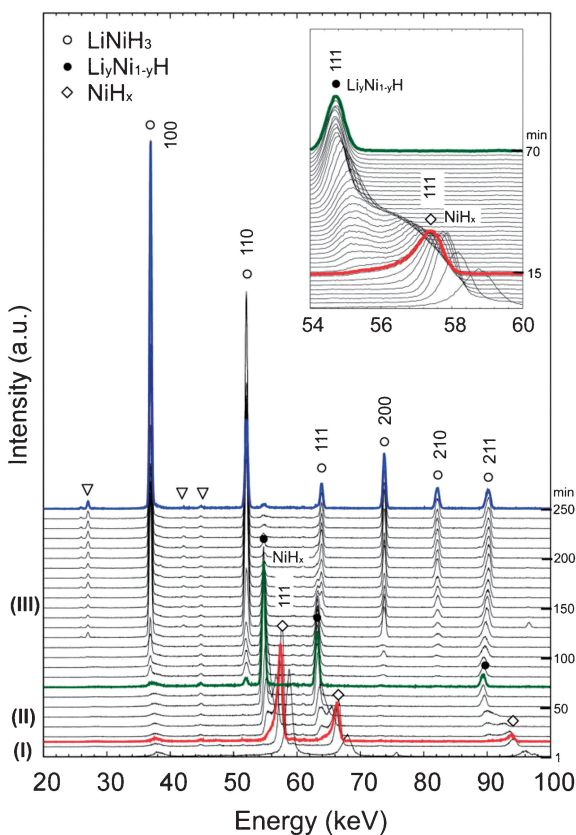


図 3  $LiH$  と  $Ni$  の混合物の 3 GPa, 600°C での水素化反応の X 線回折その場観察結果. Reprinted with permission from T. Sato, *et al.*, Appl. Phys. Lett., **102**(2013), 09190. Copyright 2013 American Institute of Physcs. (オンラインカラー)

- (8) 佐々木拓生, 高橋正光: 応用物理, **87**(2018), 409-415.
- (9) 高橋正光: 日本結晶成長学会誌, **42**(2015), 201-209.
- (10) M. Takahasi: Jpn. J. Appl. Phys., **57**(2018), 050101.
- (11) T. Sasaki, H. Suzuki, A. Sai, J.-H. Lee, M. Takahasi, S. Fujikawa, K. Arafune, I. Kamiya, Y. Ohshita and M. Yamaguchi: Appl. Phys. Express, **2**(2009), 085501.
- (12) K. Shimomura, H. Suzuki, T. Sasaki, M. Takahasi, Y. Ohshita and I. Kamiya: J. Appl. Phys., **118**(2015), 185303.
- (13) K. Matsuura, *et al.*: Nat. Commun., **8**(2017), 1143.
- (14) H. Kim, K. Sakaki, H. Ogawa, Y. Nakamura, J. Nakamura, E. Akiba, A. Machida, T. Watanuki and T. Proffen: J. Phys. Chem. C, **117**(2013), 26543-26550.
- (15) R. Yu, *et al.*: J. Am. Chem. Soc., **137**(2015), 12719-12728.
- (16) 綿貫 徹, 町田晃彦, H. Kim, R. Yu, 東 正樹, 水牧仁一朗: 放射光, **31**(2018), 202-211.
- (17) S. Takagi, H. Saitoh, N. Endo, R. Sato, T. Ikeshoji, M. Matsuo, K. Miwa, K. Aoki and S. Orimo: Phys. Rev. B, **87**(2013), 125134.
- (18) R. Sato, H. Saitoh, N. Endo, S. Takagi, M. Matsuo, K. Aoki and S. Orimo: Appl. Phys. Lett., **102**(2013), 091901.
- (19) 齋藤寛之, 高木成幸, 青木勝敏, 折茂慎一: 放射光, **27**(2014), 10-19.
- (20) 齋藤寛之, 高木成幸, 佐藤豊人, 折茂慎一: 高压力の科学と技術, **28**(2018), 291-298.

★★★

片山芳則

1990年 京都大学大学院理学研究科博士課程単位取得退学

1990年 慶応義塾大学理工学部助手

1997年 日本原子力研究所研究員

2016年4月- 現職

専門分野: 高圧構造物性, 液体・非晶質, 放射光利用技術

◎液体・非晶質の圧力誘起構造変化の研究に従事.

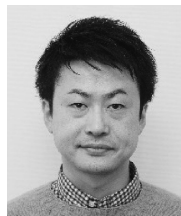
★★★



片山芳則



高橋正光



佐々木拓生



綿貫 徹



町田晃彦



齋藤寛之