

# 超高压下での X 線回折・電気抵抗の同時測定による、Li の金属-絶縁体-金属リエントラント相転移の発見

松岡岳洋

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター（現：岐阜大学） 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

坂田雅文

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

太田健二

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター（現：東京工業大学） 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

中本有紀

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

平尾直久

公益財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1 丁目 1-1

大石泰生

公益財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1 丁目 1-1

清水克哉

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

## 要旨

アルカリ金属元素リチウムが圧力誘起結晶構造相転移に伴って金属 (<80 GPa) → 半導体 (80-120 GPa) → 金属 (>120 GPa) 転移を起こすことを、X 線回折と電気抵抗の同時測定によって発見した。もっとも“シンプル”な金属元素が圧力下で示す多彩な物性を紹介する。また、超高压力実験における複数物性の同時測定技術とその利点及び重要性を述べる。

## 1. はじめに

常圧における電子状態が自由電子模型 (nearly free electron model) で良く近似できるリチウム (Li) は、金属の物理的性質を理解する上でのモデル物質として重要な役割を担ってきた。しかし Li が圧力下で圧縮されたとき、自由電子模型は破綻して多彩で新奇な物性が出現する。

まず圧力の上昇に伴って結晶構造が対称性の低いものへと変化する (Fig. 1)。剛体球を箱にできるだけ密に詰め込んだ場合、最も稠密な構造は face centered cubic (fcc) 若しくは hexagonal closed-packed (hcp) 構造であるが、Li の結晶構造は fcc には留まらず六方晶の *hR1* 構造へと転移する。さらに *hR1* 構造に続いて、body centered cubic (bcc) の  $2 \times 2 \times 2$  の超格子とみなすことが出来る立方晶の *cI16* 構造へと転移する<sup>1,2)</sup>。*cI16* 構造から更に圧縮を進めると、ユニットセルあたり 88 個の原子を含む斜方晶の *oC88*、40 個の原子を含む *oC40* 構造、24 個の原子を含む *oC24* 構造が出現する<sup>3-5)</sup>。また、常圧で冷却すると

100 K 以下の温度で bcc 構造から *9R* 構造や複数の不規則構造に転移することも知られている<sup>6,7)</sup>。驚くことに *cI16* 構造では Li の融点が室温付近まで降下することが報告されている<sup>3,8)</sup>。電気伝導特性についてみると、圧力の印加にともなって急激な電気抵抗率の増大が起こる<sup>9-11)</sup>。その一方で常圧では 0.4 mK と極めて低い超伝導転移温度  $T_c$  は、30-40 GPa では 15 K を超える温度まで上昇する<sup>12-15)</sup>。さらに、80 GPa 以上で *oC40* 構造へ転移するに伴い、Li は金属から半導体へ転移する<sup>11)</sup>。これらの物性変化は圧力下で起こる 2s-2p 軌道混成の結果、フェルミ面

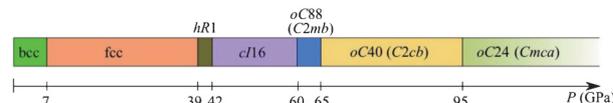


Fig. 1 (Color online) Crystal structures of Li under high pressure (adopted from Refs. 1, 2, 3, 4, 5, 27). Transition pressures reported here are from experiments performed at 200 K.

の変形と Jahn-Teller 効果によってもたらされると考えられている<sup>16-18</sup>。また、Li の半導体相は Li 原子の最外殻にあった電子が格子間に局在して副格子を作る、electride であると考えられる<sup>5,16,19-21</sup>。

Li が *o*C40 構造で半導体に転移することが明らかになると、次に来る興味は *o*C24 構造やそれよりも高い圧力領域で現れる結晶構造相における電気伝導特性である。このような圧力域では Li の結晶構造安定性や融点の降下を説明する上で零点振動エネルギー（量子効果）が無視できないことが理論計算により提唱されている<sup>4,5,19</sup>。もし量子効果が顕著に現れる密度領域で Li の再金属化が起これば、金属水素で期待されているような高温超伝導が現れると期待できるかもしれない。

## 2. 高圧力下 X 線回折と電気抵抗の同時測定技術

X 線回折と電気抵抗の同時測定は SPring-8 の BL10XU のハッチ 1（上流側ハッチ）に於いて行った。BL10XU では複数物性の同時測定システムの構築が進められており、X 線回折と同時若しくはほぼ同時に Raman 散乱測定、電気抵抗測定、メスbauer分光測定が可能である。

本研究では高圧力発生にダイヤモンドアンビルセル (DAC) を用いた (Fig. 2a)。DAC は対向する単結晶ダイヤモンド (ダイヤモンドアンビル) の間で圧力保持材 (ガスケット) に封入した試料を挟み込み、両ダイヤモンドのギャップを狭める駆動力を変換して試料に圧力を印加する装置である。ダイヤモンドが幅広い波長の光に対してほぼ透明であることから、ダイヤモンドアンビルを通して試料の顕微鏡観察が出来る他、Raman 散乱等の各種光学測定や X 線回折測定が可能である (ダイヤモンドの吸収帯には注意が必要である。)。求める実験条件 (圧力、試料サイズ) によってアンビルの先端径や形状を選択する。本研究では先端径  $100\ \mu\text{m}$  をもつベベルドアンビル (多段カットを施したアンビル) を用い、試料サイズは  $35\ \mu\text{m}^{\phi} \times 20\ \mu\text{m}^{\dagger}$  である。試料を冷却する目的から DAC は熱伝導性の良いベリリウム銅合金製の物を使用した。室温から約 6 K までの試料の冷却は、DAC ごと冷凍機に装着して圧力を印加した状態で行う。試料の圧力は冷凍機外部から導入された He ガスの圧力を駆動力に用いて調節が可能であり、実験では 50~150 K で圧力を変化させた後、電気抵抗の温度依存性を測定するために約 6 K まで冷却を行うサイクルを繰り返した。Fig. 2b~d に DAC 内の試料周辺部と電気抵抗測定用電極の一例を示す。DAC の実験ではレニウムやタングステン、ステンレスといった金属をガスケット材に用いることが多いが、電気抵抗測定では電極が試料以外の金属とは絶縁されている必要がある。Fig. 2b に示すダイヤモンドパウダーとエポキシ接着剤で形成された絶縁層 (insulation layer) がこの役割を持ちつつガスケット

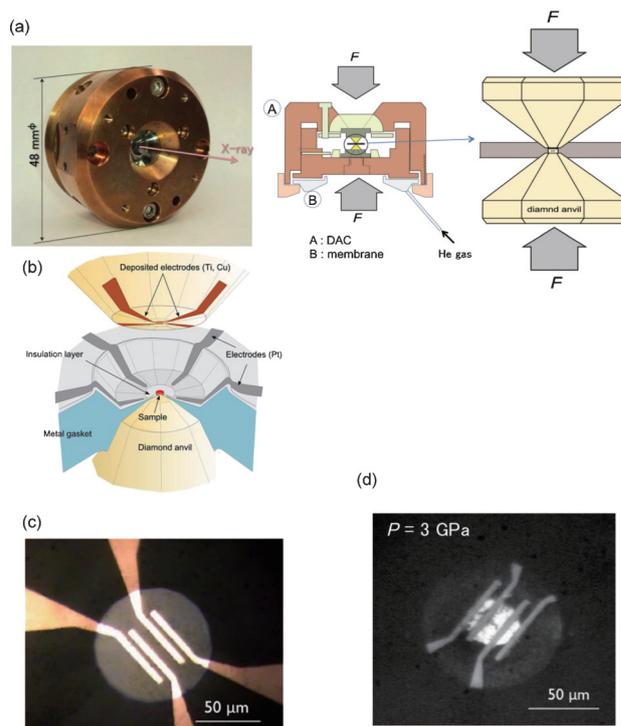


Fig. 2 (Color online) a) Diamond Anvil Cell (DAC) A metal-membrane driven by high-pressure He gas generates force  $F$  to push diamond anvils together. b) Schematic drawing for the configurations of gasket, sample, diamond anvil, and electrodes, c) Fine electrodes deposited on a surface of diamond anvil for electrical resistance measurement, d) Sample (blight circle) and electrodes under pressure looking through a diamond anvil.

材としても働く。電気抵抗測定はダイヤモンドアンビル上にフォトリソグラフィを用いて蒸着形成した微細電極を用いて 4 端子法によって行った (Fig. 2c, d)。この微細電極はダイヤモンド上に比較的強固に蒸着できるチタン (Ti) と Li との接触抵抗が小さい銅 (Cu) の 2 層構造になっており、合計の厚みは  $0.8\ \mu\text{m}$  程度である。Cu は Ti の酸化防止の役割もつ。微細電極はガスケット上で白金 (Pt) 線に接続され、DAC 外部に引き出されて、電気抵抗測定装置に接続される。DAC への試料の封入作業は Li の酸化や水酸化を防ぐため、アルゴンガスグローブボックス内 (酸素及び水分を 1 ppm 以下に保持) で行った。同様に試料との化学反応を避けるため、圧力媒体は用いていない。圧力測定はダイヤモンドアンビルと試料が接触する部分で Raman 散乱測定を行い、ダイヤモンドの C-C 伸縮振動モードの Raman シフト量から赤浜らによって作成された圧力スケールを用いて計算した<sup>22</sup>。DAC を用いた高圧力下電気抵抗測定技術の解説・例は参考文献の 23 に詳しい。

X 線回折測定ではダイヤモンドアンビルを通して試料に X 線ビームを照射し、反対側のアンビルを通して出てきた回折線をイメージングプレート (IP) で観測する前方散乱配置をとった。DAC は GM 式冷凍機内に置かれ室

温から約 6 K までの冷却を行う。GM 式冷凍機はその構造上、1 Hz 程度の振動が発生する。この振動が DAC に伝わると試料が数〜数十  $\mu\text{m}$  の幅で振動することになるが、これは DAC 内の試料サイズと同程度である。X 線回折プロファイルにガスケットのピークが混在すると、試料の回折ピークの観測や構造解析の妨げになることがあるため、試料部の振動を抑えることは非常に重要である。BL10XU では DAC 取付部を冷凍機の真空断熱管に振動緩衝機構を介して保持し、DAC とコールドフィンガー（最も冷える部分）の間の熱接続は弛ませた銅線の束でとることで、冷凍機からの振動を遮断しながら DAC の冷却を可能にしている。現在、試料部の振幅は 5  $\mu\text{m}$  以下である。

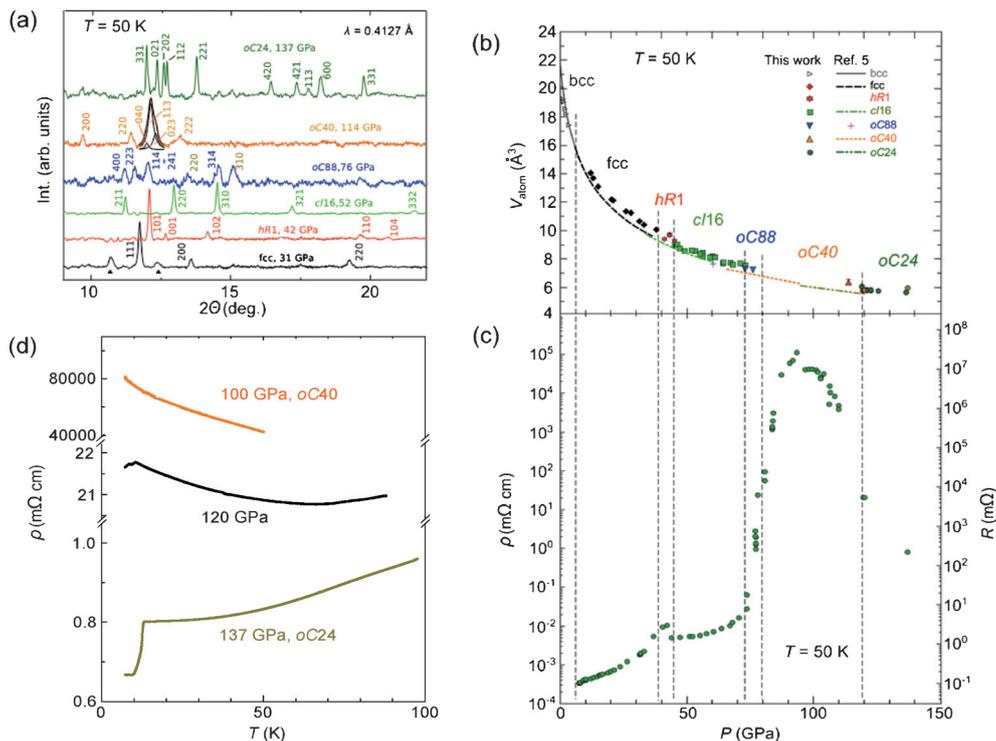
ここで超高压実験における複数物性の同時測定の重要性和利点について、「物性の議論」と「実験技術・効率」の観点から述べておきたい。まず「物性の議論」であるが、数十 GPa 超の高圧実験において複数の物性を個別の実験で測定するとき、試料に加わる応力を実験ごとに精確に再現することは極めて困難であるという問題が存在する。圧力媒体を使用しない実験では、試料上の応力分布が試料の形状や周囲を取り巻くガスケットやアンビルの形状に強く依存するため、問題は特に深刻である。圧力媒体がある場合でも試料がアンビルと接触した場合などは無視できない大きさの歪みが試料に加わることが多々ある。圧力の見積もりについても同様であり、圧力マーカー（ルビーや Pt, Au, NaCl）に加わる応力が異なれば（静水圧性の度合いが異なれば）、算出される圧力値にズレが生じることになる。従って、ある実験で観測した現象と別の実験で観測した現象（例えば構造相転移と電気抵抗率の変化）の関係、特に相転移付近の現象を厳密に議論するためには、ある応力・温度条件下で複数物性を同時に測定することが最も直接的な手段となる。結晶構造は物性を議論する上で最も基礎的な情報である。電気抵抗やメスバウアー分光測定に X 線回折と Raman 散乱測定を加えることで、実験データとそこから可能になる議論のクオリティを向上させる効果が期待できる。「実験技術・効率」については、100 GPa を超えるような超高压実験では微小な試料サイズゆえに X 線回折強度が弱くなることや、試料と一緒に加圧することから生じる電極の断線等が頻発し、目的とする圧力に到達してもなお質の高いデータを得ることに困難さがつきまとう。しかもダイヤモンドアンビルが破損する = (イコール) 同じアンビルをもう一度使えない (若しくは目標圧力に到達して実験が終了した後、常圧まで減圧する際に破損する。) ことが度々であり、先述したように同一の実験条件を再現することを一層難しくする。複数物性の同時測定は困難な超高压実験を一度の実験でこなせるために格段の研究効率が得られることになる。加えて昨今はダイヤモンド原石の値上がり著しく、アンビルは非常に高価な消耗品となるため、研究費の効率的運用の観点からも同時測定には利点があると言える。X 線回折と電気抵抗の同時

測定例は本研究の他に参考文献の 25 と 26 が挙げられる。

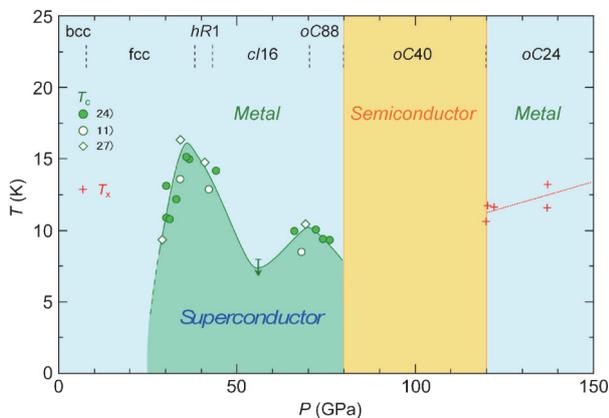
### 3. リチウムの圧力誘起再金属化

**Fig. 3** に (a) 圧力下の X 線回折プロファイル、(b) 原子体積 ( $V_{\text{atom}} = (\text{ユニットセルの体積}) / (\text{ユニットセルあたりの原子数})$ ) の圧力依存性、(c)  $T = 50 \text{ K}$  での電気抵抗率の圧力依存性、(d) 各圧力における電気抵抗率の温度依存性を示す。100 GPa 以下の電気抵抗率の圧力・温度に対する振る舞いは先行研究と良い一致を示した。圧力の増加とともに電気抵抗率が增大し、 $V_{\text{atom}}$  が常圧の約 34% まで減少したところで *oC40* 構造に転移すると、電気抵抗率が 4 桁上昇すると同時にその温度依存性が正から負に変化する (金属半導体転移)。Li の *oC40* 構造にさらに圧力を加えると、100 GPa 付近から電気抵抗率の急激な減少が起こった。120 GPa で *oC24* 構造への転移が開始すると、電気抵抗率の温度依存性に金属的な振る舞い (正の温度依存性、70 K 以上) が現れ、加えて 10 K 付近で電気抵抗率のドロップが観測された。*oC24* 構造への転移が完了した 140 GPa では電気抵抗率は正の温度依存性を示しており、Li が *oC24* 構造では再び金属となっていること (金属相へのリエンタラント) が明らかとなった。また、10 K 付近での電気抵抗率のドロップも明確になった。X 線回折測定で観測できる範囲では、この電気抵抗率のドロップが起こる温度・圧力で結晶構造に変化は無いため、超伝導転移を反映したものである可能性が考えられる。しかし、ゼロ抵抗とマイスナー効果の観測が出来ていない (現在実験中である。) ため “低温相への転移” として、電気抵抗率がドロップを始める温度を転移温度  $T_x$  とした。120 GPa と 140 GPa の電気抵抗率は半金属のグラファイトと同程度であり、*oC24* 構造の Li は電気伝導性の低い、いわゆる “悪い金属” であることが分かる。実験結果をまとめた低温領域での Li の温度圧力相図を **Fig. 4** に示す。2 つの金属相に挟まれて半導体相 (*oC40* 構造) が存在し、80 GPa 以下の金属相内には 20 K 以下に超伝導相が存在する。再金属化相にも低温領域で超伝導とみられる低温相が存在する。

半導体から金属へ転移する際の電子状態変化に着目して実験結果を理論計算と比較すると、次のようなことが推測される。半導体の *oC40* 構造において圧縮によってバンドギャップが減少する結果、電気抵抗率が減少する (電気伝導性が向上する)。*oC24* 構造へ転移すると同時にバンドギャップ閉じて伝導キャリアが生じる。Pickard らの第 1 原理計算によると *oC24* 構造ではフェルミ面の電子状態密度は小さく<sup>21)</sup>、また Marques らの計算によれば Electron Localization Function (ELF) が依然として大きい<sup>5)</sup>。したがって Li は再金属化するものの、生じる伝導キャリアの密度が小さいために電気伝導性の低い金属になっていると考えられる。*oC24* 構造で見られた電気抵抗率のドロップがもし超伝導転移であれば、この大きな ELF が電子格



**Fig. 3** (Color online) (a) Integrated XRD profiles for high pressure phases of Li at 50 K, (b)  $V_{\text{atom}}$  at 50 K as a function of pressure with data of 200 K reported in ref. 3. Broken vertical lines indicate structural phase boundaries. (c) Electrical resistance  $\rho$  vs.  $P$  at 50 K, (d)  $\rho$  vs.  $T$  at pressures. (Figures are reused from ref. 24)



**Fig. 4** (Color online)  $T$  vs.  $P$  phase diagram of Li in low-temperature region. Here, the  $T_c$  data in references 11, 24, 27 are taken from electrical resistance measurements using the same measurement method used in this study. The superconducting transition was not observed above 8 K at 56 GPa (indicated with the downward-pointing arrow). The values of  $T_x$  obtained from two separated measurements are plotted as a function of pressure. Vertical broken lines indicate structural phase boundaries. (Fig. 4 is reused from ref. 24.)

子相互作用の増大とクーパー対形成に寄与している可能性も考えられる。

## 4. まとめ

X線回折と電気抵抗の同時測定により、結晶構造相転移に伴う金属-半導体-金属転移を明らかにした。再金属化したLiは電気伝導性の低い所謂“悪い”金属であり、10 K以下に低温相が存在する。最も“シンプル”な金属元素であるLiが圧力下で示す複雑かつ新奇な温度圧力相図が得られ、物質がその密度に応じて金属と半導体の間を行き来することが初めて実証された。複数物性の同時測定は特に超高圧実験においては、物性についての議論のクオリティを高める上で有用であり、今後実験例が拡がることが期待される。

## 謝辞

本研究は日本学術振興会 NEXT プログラム (GR068)、文部科学省グローバル COE プログラムの支援を受けて行われた。実験はSPring-8長期課題 (2011B0038, 2012A0038)のもと実施した。ここに記し感謝いたします。

## 参考文献

- 1) M. Hanfland, K. Syassen, N. E. Christensen and D. L. Novikov: Nature (London) **408**, 174 (2000).
- 2) M. Hanfland, I. Loa, K. Syassen, U. Schwarz and K. Takemura: Solid State Commun. **112**, 123 (1999).

- 3) C. L. Guillaume, E. Gregoryanz, O. Degtyareva, M. I. McMahon, M. Hanfland, S. Evans, M. Guthrie, S. V. Sinogeikin and H.-K. Mao: Nat. Phys. **7**, 211 (2011).
- 4) F. A. Gorelli, S. F. Elatresh, C. L. Guillaume, M. Marques, G. J. Ackland, M. Santoro, S. A. Bonev and E. Gregoryanz: Phys. Rev. Lett. **108**, 055501 (2012).
- 5) M. Marques, M. I. McMahon, E. Gregoryanz, M. Hanfland, C. L. Guillaume, C. J. Pickard, G. J. Ackland and R. J. Nelmes: Phys. Rev. Lett. **106**, 095502 (2011).
- 6) H. G. Smith: Phys. Rev. Lett. **58**, 1228 (1987).
- 7) W. Schwarz and O. Blaschko: Phys. Rev. Lett. **65**, 3144 (1990).
- 8) A. M. J. Schaeffer, W. B. Talmadge, S. R. Temple and S. Deemyad: Phys. Rev. Lett. **109**, 185702 (2012).
- 9) M. Bastea and S. Bastea: Phys. Rev. B **65**, 193104 (2002).
- 10) V. E. Fortov, V. V. Yakushev, K. L. Kagan, I. V. Lomonosov, V. I. Postnov and T. I. Yakusheva: JETP Lett. **74**, 418 (2001).
- 11) T. Matsuoka and K. Shimizu: Nature **458**, 186 (2009).
- 12) J. Tuoriniemi, K. Juntunen-Nurmilaukas, J. Uusvuori, E. Pentti, A. Salmela and A. Sebedash: Nature **447**, 187 (2007).
- 13) K. Shimizu, H. Ishikawa, D. Takao, T. Yagi and K. Amaya: Nature **419**, 597 (2002).
- 14) S. Deemyad and J. S. Schilling: Phys. Rev. Lett. **91**, 167001 (2003).
- 15) V. V. Struzhkin, M. I. Eremets, W. Gan, H.-K. Mao and R. J. Hemley: Science **298**, 1213 (2002).
- 16) J. B. Neaton and N. W. Ashcroft: Nature **400**, 141 (1999).
- 17) A. Rodriguez-Prieto, A. Bergara, V. M. Silkin and P. M. Echenique: Phys. Rev. B **74**, 172104 (2006).
- 18) A. Bergara, J. B. Neaton and N. W. Ashcroft: Phys. Rev. B **62**, 8494 (2000).
- 19) J. Lv, Y. Wang, L. Zhu and Y. Ma: Phys. Rev. Lett. **106**, 015503 (2011).
- 20) B. Rousseau and N. W. Ashcroft: Phys. Rev. Lett. **101**, 046407 (2008).
- 21) C. J. Pickard and R. J. Needs: Phys. Rev. Lett. **102**, 146401 (2009).
- 22) Y. Akahama and H. Kawamura: J. Appl. Phys. **100**, 043516 (2006).
- 23) K. Shimizu, K. Amaya and N. Suzuki: J. Phys. Soc. Jpn. **74**, 1345 (2005).
- 24) T. Matsuoka, M. Sakata, Y. Nakamoto, K. Takahama, K. Ichimaru, K. Mukai, K. Ohta, N. Hirao, Y. Ohishi and K. Shimizu: Phys. Rev. B **89**, 144103 (2014).
- 25) T. Matsuoka, N. Hirao, Y. Ohishi, K. Shimizu, A. Machida and K. Aoki: High Pressure Research **31**, 64 (2011).
- 26) K. Ohta, R. E. Cohen, K. Hirose, K. Haule, K. Shimizu and Y. Ohishi: Phys. Rev. Lett. **108**, 026403 (2012).
- 27) T. Matsuoka, S. Onoda, M. Kaneshige, Y. Nakamoto, K. Shimizu, T. Kagayama and Y. Ohishi: J. Phys. Conf. Ser. **121**, 052003 (2008).

## 著者紹介



## 松岡岳洋

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター（現在の所属：岐阜大学工学部 電気電子情報工学科 機能材料工学科）助教  
E-mail: tm6@gifu-u.ac.jp

## 【略歴】

2008年 大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻 博士後期課程終了 博士（理学）。2008年 大阪大学極限量子科学研究センター 特任研究員。2009年 財団法人高輝度光科学研究センター 協力研究員。2011年 大阪大学極限量子科学研究センター 特任助教。2011年 Washington University in St. Louis 招聘研究員兼務。2011年-現在 公益財団法人高輝度光科学研究センター 外来研究員 兼務。2013年 岐阜大学工学部電気電子情報工学科 機能材料工学科 助教 現在に至る。



## 坂田雅文

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 特任講師  
E-mail: sakata@stec.es.osaka-u.ac.jp

専門：高圧物性，超伝導

## 【略歴】

2003年 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了 博士（理学）。2003年 京都大学大学院理学研究科 研究機関研究員。2006年 科学技術振興機構 CREST 研究員（東北大学工学研究科）。2007年 京都大学大学院理学研究科 産学官連携研究員。2007年 大阪大学極限量子科学研究センター 特任研究員。2012年 大阪大学極限量子科学研究センター 特任助教。2013年 岡山大学大学院自然科学研究科特任講師。2014年 大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 特任講師 現在に至る。



### 太田健二

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター（現在の所属：東京工業大学 大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻）講師  
E-mail: k-ohta@geo.titech.ac.jp

専門：高圧地球科学

#### 【略歴】

2010年 東京工業大学大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻 博士過程修了 博士（理学）。2010年 東京工業大学大学院理工学研究科 地球惑星科学専攻 在勤 日本学術振興会特別研究員（PD）。2011年 大阪大学極限量子科学研究センター 在勤 日本学術振興会特別研究員（SPD）。2013年 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻 講師 現在に至る。



### 大石泰生

公益財団法人高輝度光科学研究センター 主幹研究員

専門：高圧構造物性，放射光 X 線光学

#### 【略歴】

1989年 大阪大学大学院基礎工学研究科 博士前後期課程修了。1989年 住友化学工業株式会社，筑波研究所勤務。1991年 博士（筑波大学，工学）取得。1997年 財団法人高輝度光科学研究センター ビームライン部門。2001年 財団法人高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 構造物性 I グループ 極限構造チーム。2012年 公益財団法人高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 構造物性 I グループ グループリーダー 主幹研究員 現在に至る。



### 中本有紀

大阪大学 基礎工学研究科附属極限科学センター 技術専門職員

E-mail: nakamoto@stec.es.osaka-u.ac.jp

専門：高圧物性，粉末 X 線回折

#### 【略歴】

1989年 徳島大学工学部化学工学科 卒業。1989年 大阪大学極限物質研究センター 技官。2001年 大阪大学極限科学研究センター 技術専門職員。2002年 大阪大学大学院基礎工学研究科 博士（工学）取得。2006年 大阪大学極限量子科学研究センター 技術専門職員。2007年-2014年 高輝度光科学研究センター 外来研究員 兼務。2010年-2011年 米国 Carnegie Institution of Washington Geophysical Laboratory 招聘研究員 兼務。2014年 大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 技術専門職員 現在に至る。



### 清水克哉

大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 教授

専門：高圧物性

#### 【略歴】

1994年 大阪大学大学院基礎工学研究科 博士後期課程修了，博士（理学）。1994年 日本学術振興会 特別研究員。1996年 大阪大学大学院基礎工学研究科 助手。2002年 大阪大学大学院基礎工学研究科 講師。2003年 大阪大学極限科学研究センター 教授。2006年 大阪大学極限量子科学研究センター 教授。2014年 大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センター 教授 現在に至る。



### 平尾直久

公益財団法人高輝度光科学研究センター 研究員

専門：高圧地球惑星科学

#### 【略歴】

2004年 東北大学大学院理学研究科地球専攻博士後期課程修了，博士（理学）。2004年 東北大学大学院理学研究科21世紀 COE フェロー。2005年 兵庫県立大学大学院物質理学研究科 在勤 日本学術振興会特別研究員（PD）。2006年 公益財団法人高輝度光科学研究センター 研究員 現在に至る。

# Pressure induced metal-semiconductor-metal transitions of Li as observed through simultaneous XRD and electrical resistance measurements

**Takahiro MATSUOKA** Center for Science and Technology under Extreme Conditions, Osaka University, Toyonaka 560-8531, Japan  
(Current: Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Gifu University, Yanagido 501-1193, Japan)

**Masafumi SAKATA** Center for Science and Technology under Extreme Conditions, Osaka University, Toyonaka 560-8531, Japan

**Kenji OHTA** Center for Science and Technology under Extreme Conditions, Osaka University, Toyonaka 560-8531, Japan  
(Current: Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro 152-8551, Japan)

**Yuki NAKAMOTO** Center for Science and Technology under Extreme Conditions, Osaka University, Toyonaka 560-8531, Japan

**Naohisa HIRAO** Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), Sayo 679-5198, Japan

**Yasuo OHISHI** Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), Sayo 679-5198, Japan

**Katsuya SHIMIZU** Center for Science and Technology under Extreme Conditions, Osaka University, Toyonaka 560-8531, Japan

**Abstract** Simultaneous XRD and electrical resistance measurements found that alkali metal lithium (Li) changed its electrical character between metal and semiconductor accompanied with structural transitions. In this paper we introduce the various novel physical properties of Li, so called "simple" metal, induced by external pressure. The recent technical developments of simultaneous measurements under high-pressure conditions, and its benefits and importance will be discussed.