

量子で見る小さな場所の圧力分布

[1] 要旨

ダイヤモンドアンビルセル (DAC) は数十～数百 GPa の高圧力を発生できる装置であり、極限環境における物性研究に広く利用されている。NV (窒素-空孔) 中心を含むナノダイヤモンドを量子センサーとして高圧試料室内部に配置し、光学的イメージングにより圧力分布と非静水圧性という圧力環境を直接可視化することが報告された。高圧下での物性研究に新たな展開が期待できる。

[2] 本文

DAC は二つのダイヤモンドの先端で試料をはさみ込んで押すことで、地球深部に匹敵する数十～数百 GPa という高い圧力を実験室内に作り出す装置であり、高圧極限状態の物質の状態を調べるための重要な手法である。しかし、試料室内部のどこにどのような圧力状態が生じているかを把握することは容易ではなかった。また、上下の対向するアンビルダイヤモンドによって加圧されることによって生じる上下方向に偏ってかかる圧力 (一軸応力) などの「偏った圧力成分」が、物質の状態変化や測定される物性値にどのような影響を与えているかを正確に評価することも困難であった。

このたび、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻と大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センターの研究グループは、ダイヤモンド中の窒素原子と空孔からなる量子センサーである NV 中心を含むナノダイヤモンドを高圧試料室内に分散して置くことで、圧力の分布と偏りを直接画像としてイメージングする手法を構築した。具体的には、緑色レーザーとマイクロ波を当てて NV 中心の状態を読み取る「光検出磁気共鳴 (ODMR)」測定と、広い視野を一度に観察できる光学顕微鏡を組み合わせて、カメラ画像のそれぞれの画素ごとに ODMR の信号を解析することで、約 20 GPa という高圧力下における試料室内の圧力の大きさと上下方向への偏りを、二次元の「圧力地図」として可視化している (図 1 参照)。この成果は JPSJ の 2025 年 12 月号に掲載された。

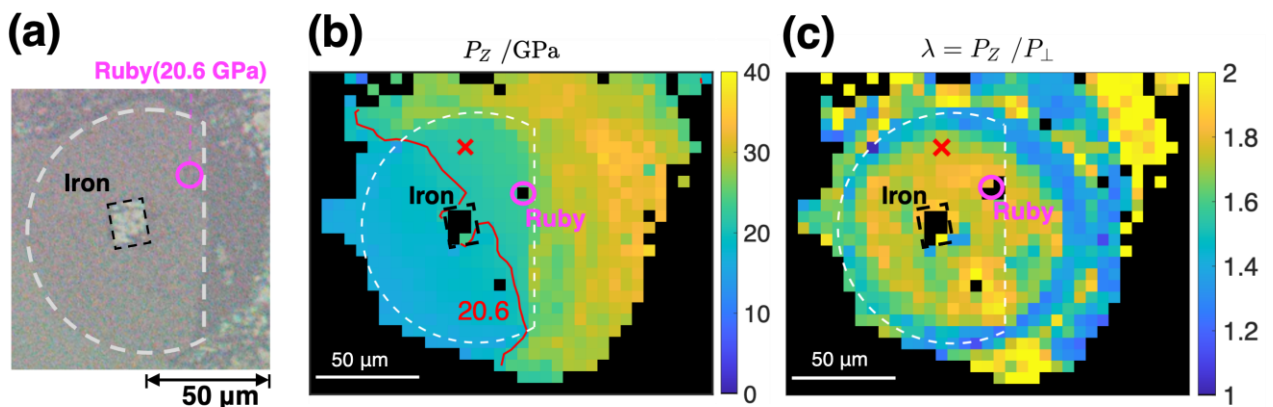


図 1. 試料室(圧力媒体単層構成):(a)実画像 (b)圧力分布 (c)異方性係数の分布

本研究では NV 中心の応力に敏感なスピン準位を用いることで、ダイヤモンドアンビルの荷重軸方向の圧力 P_z と、それに直交する方向の圧力 P_{\perp} が ODMR スペクトルに及ぼす影響を評価している。さらに画素ごとに P_z および P_{\perp} を抽出し、その比 $\lambda = P_z / P_{\perp}$ を「どれくらい圧力が偏っ

ているか」を表す指標（異方性係数）として導入することで一軸応力の強さも空間的に評価している。得られる空間分解能は数マイクロメートルのスケールであり、光学測定だけで非接触で圧力環境を読み出せる点も、応用上の大きな利点である。

さらに、ナノダイヤモンドと圧力媒体の配置を意図的に変えた二種類のサンプル構成を導入し、それぞれの圧力環境の違いを比較している。一つ目の圧力媒体を単層とした構成では、固体圧力媒体 NaCl を試料室の下側にのみ配置し、最上部にナノダイヤモンドを置くことで、ナノダイヤモンドや試料が上側ダイヤモンドアンビルと直接接触しやすい状況を再現した。この構成では、ODMR スペクトルが大きく非対称に広がり、一軸応力が強く印加されていることが示唆された。実際、解析の結果、 P_z はおよそ 14~30 GPa、 P_x は 10~20 GPa の広い分布をとり、異方性係数 λ は試料室中央付近で 1.6~1.8 に達することが分かった。

これに対して、二つ目の圧力媒体を二層とした構成では、NaCl をナノダイヤモンドの上下に配置し、挟み込むような配置とした。この場合、ナノダイヤモンドがダイヤモンドアンビルと直接接しないため、より偏りのない圧力状態が実現される。ODMR スペクトルはほぼ対称な形状となり、圧力に偏りが無い「静水圧」の状態と理論的に一致することが確認された。得られた圧力分布は 17~20 GPa の比較的狭い範囲に収まり、ルビー蛍光から見積もられる平均圧力 20 GPa ともよく一致する。また、異方性係数 λ は 1.2~1.5 程度に抑えられ、単層構成に比べて非静水圧性が大きく抑制されていることが定量的に示された。この結果によって、高压実験において試料や圧力媒体をどのように配置するかが、試料室内の応力状態を通じて観測される物性に大きな影響を与えうることが、直接的かつ定量的に示された。

高温超伝導体や磁性体など、わずかな圧力変化で相図が大きく変化する系を精密に議論するためには、試料が置かれている局所圧力環境を把握することが不可欠である。本研究で示されたナノダイヤモンド量子センサーによる圧力イメージング手法は、そのための新しい計測基盤を与えるものである。今後、液体圧力媒体や他の材料系への応用により、磁気イメージングなど NV センシングの他の機能とも組み合わせることで、高压科学における有効なツールへと発展していくことが期待される。

原論文（2025年11月19日公開済）

GPa Pressure Imaging Using Nanodiamond Quantum Sensors

R. Suda, K. Uriu, K. Yamamoto, M. Sasaki, K. Sasaki, M. Einaga, K. Shimizu, and K. Kobayashi, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 124707 (2025).

<情報提供：須田 涼太郎（東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻 小林研究室）