News Release

金沢大学
KANAZAWA UNIVERSITY

令和８年３月１１日

各報道機関文教担当記者　　様

ダイヤモンド中の量子ビットを
配向軸を揃えながら位置制御することに成功
～量子デバイス集積化への道を切り開く～

金沢大学ダイヤモンド研究センターの林寛助教と徳田規夫教授らの研究グループは、ドイツ Diamond and Carbon Applications のクリストフ E. ネーベル CEO（本学招へい教授）との共同研究により、**ダイヤモンド中の量子ビットとして有用な NV センター（※1）を、配向軸（※2）を揃えたまま任意の位置に生成する技術を開発しました。**

次世代量子技術の実現に向けて、高い安定性を有する量子ビット材料が求められています。中でも室温で動作が可能で、長いスピンコヒーレンス時間（※3）を示すダイヤモンド中 NV センターは、有望な量子ビット材料として注目されています。NV センターを用いた量子デバイスを実現するためには、NV センター間の相互作用を精密に制御する必要があり、そのためには NV センターの位置と配向軸の双方を制御することが重要です。これまで、NV センター位置制御にはイオン注入法（※4）が用いられてきましたが、結晶ダメージが生じるほか、NV センターの配向軸がランダムになるという課題がありました。

本研究グループでは、プラズマ化学気相堆積法（CVD 法）（※5）によるダイヤモンド成長条件を精密に制御することで、NV センターの配向軸を完全に揃える技術を確立してきました。一方で、上記成長条件において、NV センターの位置を制御する手法は確立されていませんでした。この問題を解決するため、本研究では 2025 年に開発した窒素ラジカルによるダイヤモンド選択的エッチング手法を採用しました。本手法は、化学反応に基づくエッチングであるため結晶ダメージを与えないと同時に、マスク材料を窒化することで長時間の CVD プロセスに耐えうる高い耐久性を付与することが可能です。その結果、選択的加工と高配向 NV センターの埋め込み成長を一括で実現する新たなプロセス技術を実現しました。本技術により、NV センターの配向と位置を同時に制御することが可能となりました。**今後、3 次元的な NV センター配列の形成や多量子ビット化などを通じて、ダイヤモンド量子技術のさらなる発展への貢献が期待されます。**

本研究成果は、2026 年 1 月 29 日に Elsevier の国際学術誌『*Carbon*』のオンライン版に先行掲載されました。

【研究の背景】

ダイヤモンド中の窒素-空孔（NV）センターは、室温でも高い安定性を示す電子スピンを有し、光による操作および読み出しが可能であることから、量子情報処理における有望な量子ビット材料候補として注目されています。特に、操作性が高く長いコヒーレンス時間を併せ持つ点が大きな特徴です。NV センターを用いた量子デバイスを実現するためには、NV センター同士の相互作用を精密に制御することが不可欠です。この相互作用は主に、NV センター間の距離と配向軸の関係に依存するため、NV センター位置を制御することに加え、配向軸も揃えることが重要となります。

これまで、NV センターの配列形成手法としてはイオン注入法が広く用いられてきました。しかし、イオン照射に起因する結晶欠陥や格子歪みが避けることができず、その結果、スピン特性の劣化やばらつきが生じるという課題がありました。また、形成される NV センターの配向軸を制御できない点も、量子ビットの高密度集積化に向けた大きな制約となっていました。一方、CVD 法を用いたダイヤモンド成長技術は、結晶品質を維持したまま不純物導入が可能であり、さらに NV センターの配向制御が可能であることから、量子デバイスの集積化に向けた新たなアプローチとして期待されています。しかしながら、NV センターの位置制御と配向制御を同時に実現する技術は、これまで確立されていませんでした。

【研究成果の概要】

本研究では、水素および窒素ガスを用いたプラズマ生成ラジカルエッチング技術（2025 年 12 月開発）と、フォトリソグラフィにより作製した Au/Ti 金属マスクを組み合わせた新たなダイヤモンド加工・成長プロセスを開発しました。本エッチングプロセスは、ラジカルによる化学反応に基づく手法であり、イオンビームなどに代表される物理的衝突を伴わないため、NV センターの特性劣化の要因となる結晶ダメージを導入しにくいと考えられます。さらに、エッチングの進行と同時に Ti マスク表面を窒化することで、CVD 成長中に問題となる金属マスクの水素による劣化に対して、耐久性を大幅に向上させることが可能となります。エッチング後、試料を CVD チャンバーから取り出すことなく連続して CVD 成長を行うことで、エッチングした領域のみに高配向 NV センターを有するダイヤモンド層を埋め込み成長させることに成功しました。図 1 に本研究で開発したプロセスの概要を示します。

作製した埋め込み NV センターの光学顕微鏡像を図 2(a)に、蛍光マッピング像を図 2(b)に示します。これらの結果から、埋め込み成長を行った領域にのみ、強い NV センター由来の蛍光が観測されました。さらに、埋め込み成長領域における光検出磁気共鳴（ODMR）スペクトル（※6）を測定したところ、通常観測される内側 2 本のピークが強い 4 本分裂構造とは異なり、外側ピークの強度が顕著に強いスペクトルが確認されま

した（図 2(c)）。この結果は、埋め込み成長によって形成された NV センターが、特定の結晶方位に高い割合で配向していることを示しています。以上の結果から、本研究で開発したプロセスにより、NV センターの配向制御と位置制御を同時に実現できることが実証されました。さらに、本プロセスは（100）基板にも適用可能であり、結晶方位の制約を受けずに NV センターの位置制御を実現できる、汎用性の高いプロセス技術であることも示されました。

【今後の展開】

本技術は、ダイヤモンド量子ビットの高密度集積および多量子ビット化を可能とする基盤技術として、量子デバイス研究に新たな展開を切り開くものです。今後は、NV センターの位置制御技術のさらなる高度化を進めることで、三次元的な量子ビット配列の実現を目指します。これにより、室温で動作するダイヤモンド量子コンピュータに向けた技術基盤の確立に貢献することが期待されます。

本研究は地域中核・特色ある研究大学強化促進事業（J-PEAKS）（JPJS00420230006）、JST 創発的研究支援事業（JPMJFR203U）、科研費（24K01344）、株式会社ダイセルの寄付により設立した金沢大学未来視内視鏡開発講座の支援を受けて実施されました。

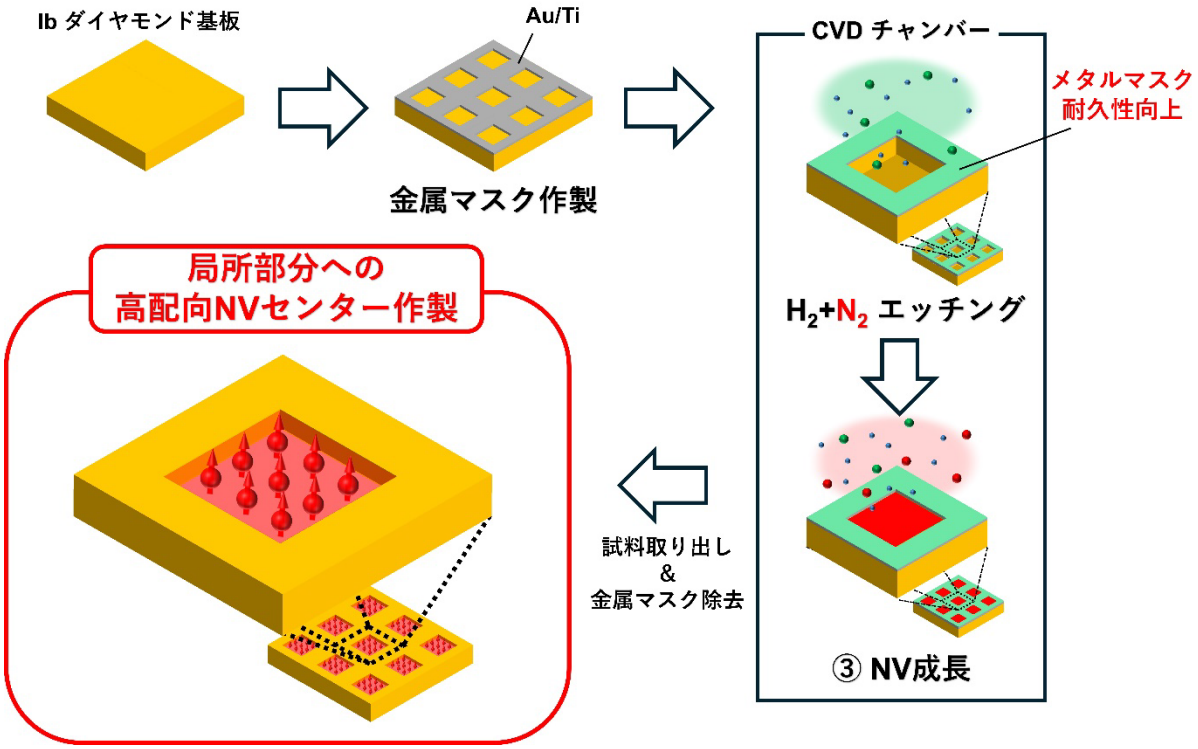

図 1. 今回開発した高配向した NV センター位置制御技術の説明図

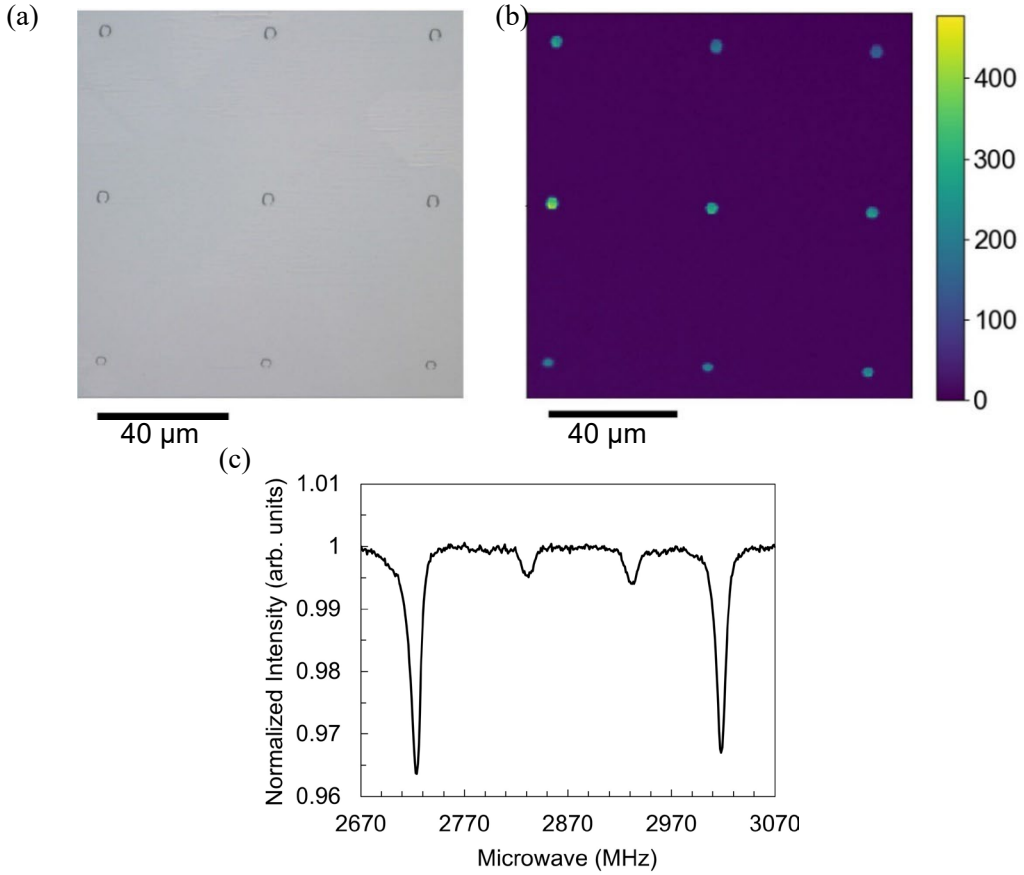

図 2. NV センター埋め込み成長を行った箇所の(a)光学顕微鏡像、(b)蛍光マッピング像、(c)ODMR スペクトル

【掲載論文】

雑誌名：*Carbon*

論文名：Selective homoepitaxial growth of buried diamond films with NV centers
（NV センターの選択的 CVD 埋め込み成長技術の開発）

著者名：Kan Hayashi, Yuto Nakamura, Madoka Katayama, Kazutoshi Shimamura, Riku Yoshida, Kazuki Kobayashi, Kimiyoshi Ichikawa, Taro Yoshikawa, Tsubasa Matsumoto, Takao Inokuma, Satoshi Yamasaki, Christoph E. Nebel, and Norio Tokuda
（林 寛、中村 勇斗、片山 まどか、島村 一利、吉田 利紅、小林 和樹、市川 公善、吉川 太朗、松本 翼、猪熊 孝夫、山崎 聡、Christoph. E. Nebel、徳田 規夫）

掲載日時：2026 年 1 月 29 日にオンライン版に掲載

DOI：10.1016/j.carbon.2026.121307
URL：https://doi.org/10.1016/j.carbon.2026.121307

【用語解説】

※1　NV センター

ダイヤモンド結晶中で、炭素原子の一部が窒素原子に置き換わり、その隣に原子が欠けた（空孔）状態からなる点欠陥です。NV センターは電子スピンを持ち、光による操作および読み出しが可能であることから、量子ビットや量子デバイス材料として注目されています。 なお、NV センターには電荷状態の異なる NV^-（負電荷）および NV^0（中性）が存在しますが、本研究で対象とする量子ビットは NV^- です。そのため本プレスリリースでは、NV^- を「NV センター」と表記しています。

※2　配向軸

NV センターがダイヤモンド結晶中で持つ特定の向き（結晶方位）のことです。ダイヤモンドの結晶構造により、NV センターの配向軸は 4 方向存在します。

※3　スピンコヒーレンス時間

量子ビットの情報を保持できる時間に相当します。長ければ長いほど量子操作の誤りが減り、より複雑な量子計算や量子シミュレーションに有利です。

※4　イオン注入法

高エネルギーの窒素イオンをダイヤモンド中に導入し、照射によって生成された空孔と窒素原子がアニールにより結合することで NV センターが形成されます。イオン注入法は、位置制御に優れている一方で、NV センター生成過程は確率的であり、結晶損傷や NV 配向の制御が難しい点が課題とされています。

※5　プラズマ化学気相堆積法（CVD 法）

水素やメタンなどのガスをプラズマ化することで、ダイヤモンド結晶成長に必要な活性種を生成し、結晶品質を維持しながら不純物導入および成長条件の精密制御が可能となります。そのため、本手法は高品質な NV センター形成や配向制御に適した成長法として用いられています。

※6　光検出磁気共鳴（ODMR）スペクトル

NV センターに光とマイクロ波を照射し、電子スピン状態の変化を蛍光強度の変化として検出する測定手法です。得られる ODMR スペクトルから、NV センターのスピン状態や配向などを評価することができます。

【本件に関するお問い合わせ先】

■研究内容に関すること

金沢大学ダイヤモンド研究センター　助教
林　寛（はやし　かん）
TEL：076-234-4853
E-mail：kan-hayashi@se.kanazawa-u.ac.jp

金沢大学ダイヤモンド研究センター　教授
徳田　規夫（とくだ　のりお）
TEL：076-234-4875
E-mail：tokuda@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

■広報担当

金沢大学理工系事務部総務課総務係
多賀　曜子（たが　ようこ）
TEL：076-234-6826
E-mail：s-somu@adm.kanazawa-u.ac.jp