# 蛍光ダイヤモンドナノ粒子を用いた ポリマーナノ構造精密温度計測

## Development of temperature measurement method of polymer nanostructures using fluorescent nanodiamonds

研究代表者　岡山大学 学術研究院自然科学学域　准教授　藤原正澄 ※
Masazumi Fujiwara

Precise measurement and control of temperature is the fundamental basis of modern industrial technology. However there are many problems in measuring temperature in the spatial range from nanometer to micrometer. In particular, it is difficult to achieve both nanoscale spatial resolution and physicochemical stability. In this research, a temperature measurement method using fluorescent nanodiamonds is developed to probe the temperature of polymer nanostructures deposited on semiconductor substrates. This technique has a potential to accurately measure the temperature of nanostructures over the wide temperature range of −100 to 300 ℃ in harsh physicochemical environments such as under vapor phase chemical reactions. To achieve this goal, in the last two years, we have analyzed the technical details of this thermometry and developed it suitable for the real usages.

**要旨**

温度の精密測定および制御は現代工業技術の基礎であるが，ナノからマイクロメートルという空間スケールでの温度測定には課題が多い．特にナノスケールの空間分解能と物理化学的安定性の両立が従来技術では困難である．本研究では，申請者らが開発してきた蛍光ナノダイヤモンド（ND）温度計測技術を半導体基板上のポリマーナノ構造精密温度計測技術に発展させる．特に，−100～300℃という幅広い温度領域や気相化学反応下などの厳しい物理化学環境下においてもナノ構造の温度を精密に測定する技術を蛍光ND を用いて開発することを目指す．この目的を達成するために，この２年間では，視野数十マイクロメートルを同時に温度測定する技術を構築するとともに，必要な温度精度や懸念されるアーティファクトなどの評価を行った．

## １．　まえがき

温度の精密測定および制御は現代工業技術の基礎であるが，ナノメートルからマイクロメートルという空間スケールでの温度測定には有用な手法が存在しない．特にナノスケールの空間分解能と物理化学的安定性の両立が従来技術では困難である．例えば，シリコン基板上に形成されたレジストナノ構造の実温度測定はより高精度な半導体製造技術の品質管理に重要である(1)．現在のレジスト構造はEUV（極端紫外線）露光技術などで数10 nmの小ささにまで達しており，その微細部分の精密温度制御が品質向上の鍵となっている．抵抗温度計などの電子技術では最小でも数十マイクロメートルの空間分解能しか有していない(2)．また，サーモグラフィーではレジスト薄膜ではなく，半導体基板温度を測定してしまうため，レジスト薄膜そのものの温度を評価できない(3),(4)．本研究のナノ構造温度計測が実現できれば，レジストのベーキングやプラズマエッチング中に，ナノ構造の温度を「その場」測定する事が可能となると期待される．

筆者らは，蛍光ナノダイヤモンド（蛍光ND）の電子スピン共鳴が有する温度依存性を利用したリアルタイムナノ温度計測技術をバイオ応用に特化して開発し[3]，幹細胞や線虫の内部温度計測に世界で初めて成功した[1],[2],[4]．この測程技術では直径10 nm程度の単一蛍光ND粒子の温度を時間分解能500ミリ秒，温度精度0.1℃以下，50時間以上の長期間測定することができる．センサ特性としても，−100～300℃の範囲にわたって直線的な応答性を示し，化学的に極めて安定である[5]．これを用いれば，レジスト加工過程のような極限環境においてナノ温度計測が可能であるというのが本研究の着想である．これを実現するために，この２年間では当該温度計測技術をポリマーナノ構造温度計測に最適化するための技術開発を行った．

※ 大阪市立大学大学院理学研究科 講師

## ２．光検出電子スピン共鳴を用いた温度計測の実際

### ２．１　光スピン型温度計測

まず，筆者らの有する蛍光ND温度計測の原理を説明する．この測定では，蛍光NDが示す光検出磁気共鳴現象（ODMR）という電子スピン共鳴の一種を利用する．筆者らの用いる蛍光NDは，窒素欠陥（NV）中心が発光するものである[5]．NV中心はダイヤモンド中の不純物窒素原子と空孔が隣接した色欠陥中心である（図1(a)）．量子数1のスピン系であり，$C_{3v}$対称性のもと，$m_S = 0$，$\pm 1$の三重項基底状態を有する（$^3A$）（図1(b)）．$m_S = 0$と$m_S = \pm 1$の状態間は2.87 GHz程度のゼロ磁場分裂を有している．緑色の光励起により，スピンは保存されたまま$^3A$から励起状態（$^3E$）に遷移する．しかしながら，$m_S = \pm 1$状態はスピン軌道相互作用による系間交差によって，近傍の一重項状態($^1A$，$^1E$)を経由して，$^3A$の$m_S = 0$状態に緩和する．その結果，光励起後にスピン状態が$m_S = 0$に初期化され，さらに，共鳴マイクロ波照射時には蛍光強度が減少する．光を通じてスピン共鳴を観測するため，通常のマイクロ波の吸収放出を捉えるスピン共鳴測定より数桁以上高感度であり，単一の電子スピン共鳴の観測もなされている[5]．

温度計測においては，ゼロ磁場分裂周波数が温度依存性を示すことを利用する．この温度依存性はその機構が完全に明らかにされているわけではないが，一義的には温度による格子膨張および電子格子相互作用の温度依存性によると理解されている．ゼロ磁場分裂の温度依存性は，5.6～1000 Kの温度範囲で確認されており[5],[6]，温度計としての実用的な範囲は100～1000 K程度であると考えられている．温度測定には，連続波ESRやパルスESRの手法など複数の手法が報告されているが，これらは温度によるゼロ磁場分裂の変化をどのようにして高精度・高感度・高速に計測するかという様々な工夫と考えられる．

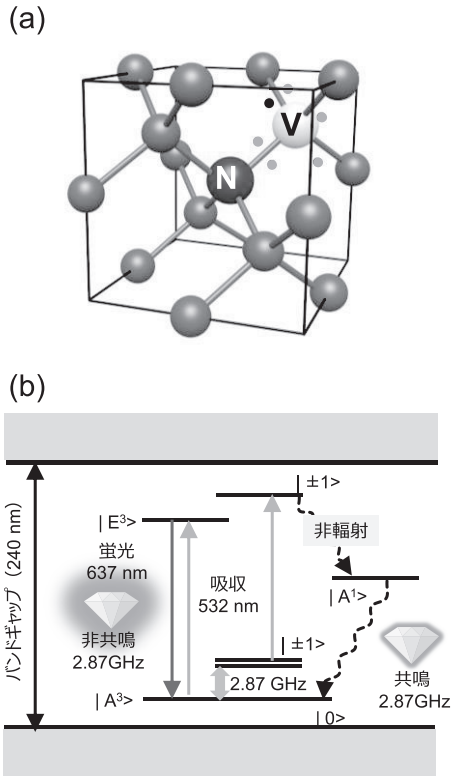


図１：(a) NV中心の結晶構造．(b) NV中心のエネルギー構造とODMRの原理図．

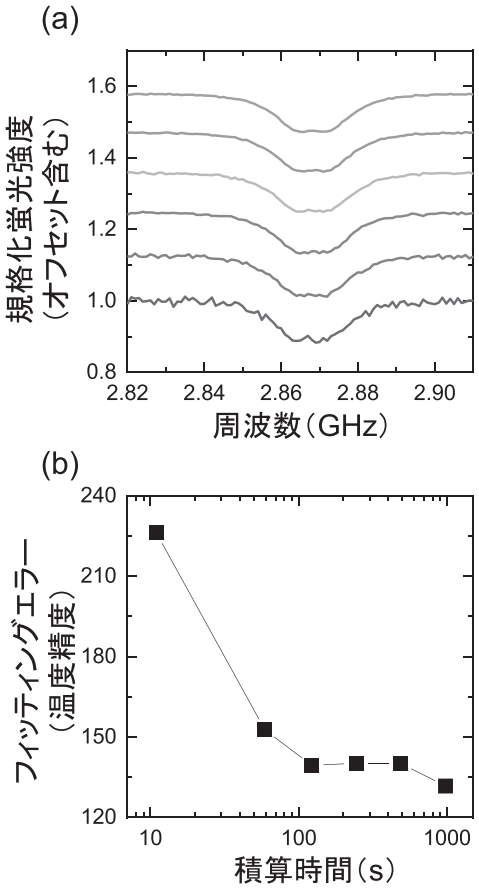


図２：(a) 積算時間を大きくしていった際のODMRスペクトルの変化（下から順に積算時間が大きくなる）．(b) 中心周波数のフィッティングエラーと積算時間の関係．

## ２．２　スペクトル全体の変化から温度測定を行う場合

上述のように，ODMR を用いた温度計測は温度による共鳴シフトを読むというのが本質である．直感的に分かりやすいのはスペクトル全体を計測する手法であるが，測定時間が長くなることが大きな問題となる．図 2 にスペクトル全体を測定する手法での測定時間と測定精度の関係を示した．平均粒径 100 nm 蛍光 ND が示す NV 中心の ODMR スペクトルをローレンツ関数でフィッティングし，その中心周波数のフィッティング精度を温度精度とした．一つの粒子に対して約 500 個程度の NV 中心が含まれており，測定条件としては一秒間に 2.0 Mcps（$2.0\times10^6$ 個）の光子検出を行っている．図 2 が示すように，例えば約 2℃の測定精度（約 140 kHz）を得るには 2 分程度の積算が必要である．また，この測定精度は ODMR のスペクトル形状などにもよるため，実際に 1℃の精度をリアルタイムで得るのは困難である．Simpson らはこれを解決する手法として数百個の蛍光 ND の ODMR スペクトルを同時に測定することで測定精度を向上させる手法を提案している[7]．

## ２．３　多点化による高速温度測定法

ODMR 高速化のために，スペクトル全体を測定するのではなく，スペクトル上の数点（3 点もしくは 4 点）を測定する多点 ODMR 測定を導入した[8),(9)]．複数の測定法を定量的に比較して，生体温度計測への適合性を比較した．具体的には，図 3 に示した周波数点のうち$\omega_1$，$\omega_2$，$\omega_3$，$\omega_4$を使う 4 点法，$\omega_-$，$\omega_+$と非共鳴周波数 2.65 GHz を利用する 3 点法，そして，4 点法を拡張して$\omega_1$，$\omega_2$，$\omega_3$，$\omega_4$，$\omega_-$，$\omega_+$を用いる 6 点法を比較した[3]．図 3 は同一の蛍光 ND に対して階段状の温度変化を加えた場合に，それぞれの測定法で温度計測を行った場合のプロファイルである．いずれの測定法においても同様の結果を示しているが，細かいところではそれぞれ異なる挙動を示している．一つ目に測定方法によって ODMR の温度依存性が異なって測定される．それぞれ 4 点法では-54.1 kHz/K，3 点法では-95 kHz/K，6 点法では-67.5 kHz/K という依存性が測定された．3 点法が 4，6 点法に比べて大きく出る理由はスペクトル形状をローレンツ型に近似してピーク位置の推定を行っているためである．アンサンブル NV 集団が示す ODMR スペクトルの形状

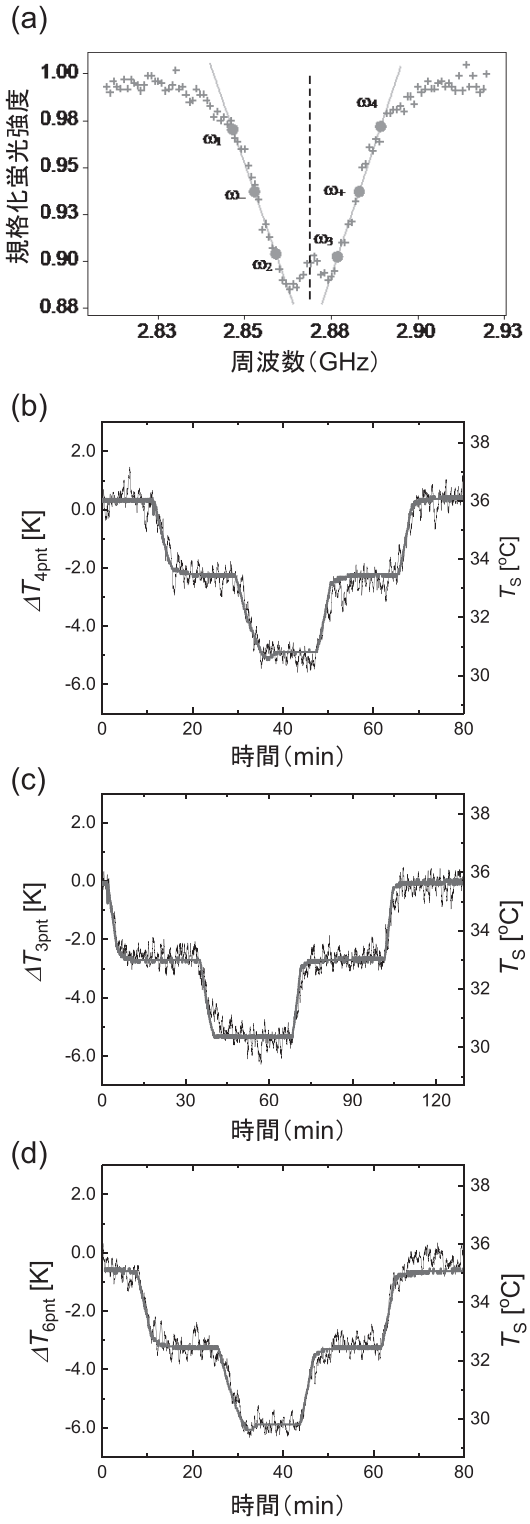


図 3：(a) 多点 ODMR 測定における周波数点．同一の ND に対して，(b) 4 点法，(c) 3 点法，(d) 6 点法によって測定した温度プロファイル．黒線が NV センターによる温度計測（20 点移動平均）．赤線が外部ヒーター温度．右縦軸の $T_s$ は極薄抵抗温度計をカバーガラス上に貼り付けて校正した基板温度．

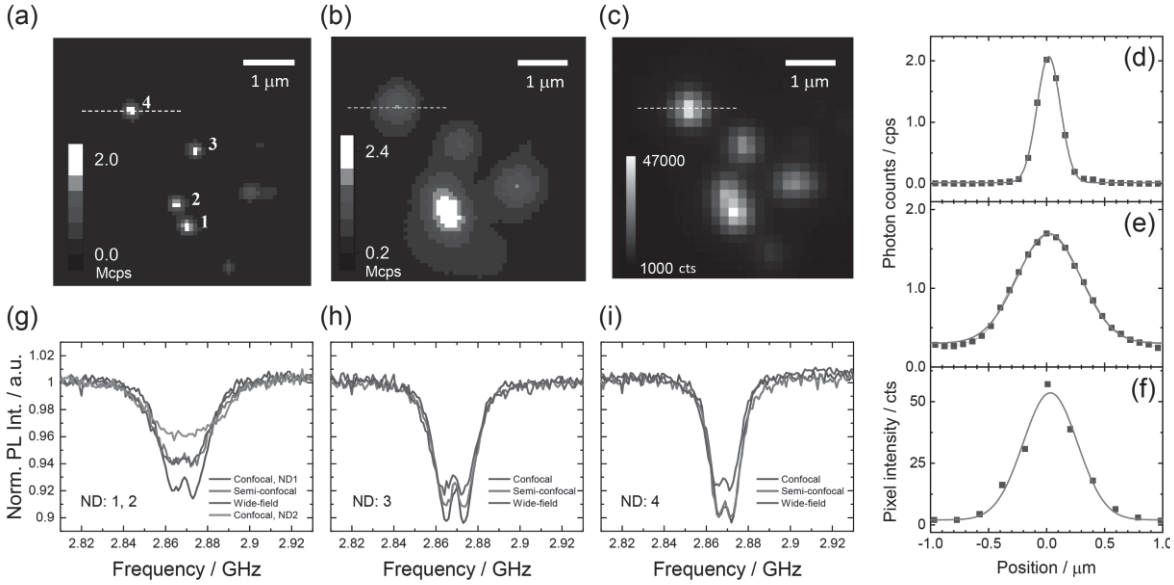


図４： 共焦点法(a)、半共焦点法(b)、および、広視野法(c)による蛍光ND の顕微画像。共焦点法(d)、半共焦点法(e)、および、広視野法(f)における、４番の蛍光ND の断面図。(g)，(h)，(i)異なる顕微鏡法で測定した１〜４番までの蛍光ND のODMR スペクトル.

はスピン状態の量子干渉やND 内部の歪みなどの結果，スペクトル線が分裂することが知られており，そのピーク形状は単純な解析関数では記述できない[(10),(11)]．今回のODMR 形状の場合，実際にはガウス関数やフォークト関数の方が良好なフィッティング結果を与えるが，ローレンツ型以外の関数では正しい温度変化を推定できないことが原因である．また，６点法による測定の結果明らかとなったこととして，温度変化によって単純にスペクトルが平行移動するのではなく，1%以下というごく僅かなスペクトル形状の変化を伴うことが明らかとなった．具体的には，ピークのベース部分と先端部分で異なる温度シフトを示すために，６点法では，その違いが顕著に表れる結果となっている．実用的な観点からは，結果の整合性を議論するためには，常に同じ測定法で測定することが必要と考えられる．

## ３．顕微測定法およびアンテナ形状の検討

### ３．１　共焦点との比較，アーティファクトの検討

ODMR 測定は蛍光顕微測定であることから，蛍光検出の違いに応じて共焦点法と広視野法（エピ蛍光）の２つが知られている．これまで，この２つの方法が世界各国のグループでそれぞれ採用されてきたものの，この２つの方法と温度測定との関係を詳細に研究した報告はなかった．そこで，実用的な開発方向性を定めるためにも，これら２つの方法の差異を詳細に研究した．

図４(a)〜(c)は共焦点法・半共焦点法（広視野励起で検出のみピンホールを採用）・広視野法によって測定した蛍光ND の顕微画像である．共焦点法が最も空間分解能が高いことが分かる．この画像中の４つの蛍光ND に対してそれぞれの方法でODMR 検出を行った．共焦点ODMR 検出では，アバランシェフォトダイオード（APD）では，200 μsのゲート幅でマイクロ波照射のON およびOFF 状態に対してゲートしてフォトンカウンティングを行いながらマイクロ波の周波数を掃引した．広視野ODMR 検出では，電子増倍CCD カメラ（EMCCD）にゲート信号を導入し，マイクロ波のON とOFF に対して16 ビット蛍光画像を取得することで，ODMR 信号を測定した．詳細はここでは踏み込まないが，適切な検出光子数が得られれば，それぞれの測定法によって測定温度感度に大きな差は生じないことが明らかとなった[4]．また，特に広視野法においては，背景蛍光の影響で，共焦点法よりODMR 信号の大きさが若干減少することも明らかとなった．

次に，広視野法に特有の測定アーティファクトを分析した．温度センサである蛍光ND の輝点周りに設定する関心領域（ROI: Region of interest）である．このROI の選択とカメラのピクセル飽和の存在の影響を分析した．図５(a)，(b)はある非常に明るい蛍光ND に対して，異なるサイズのROI を設定

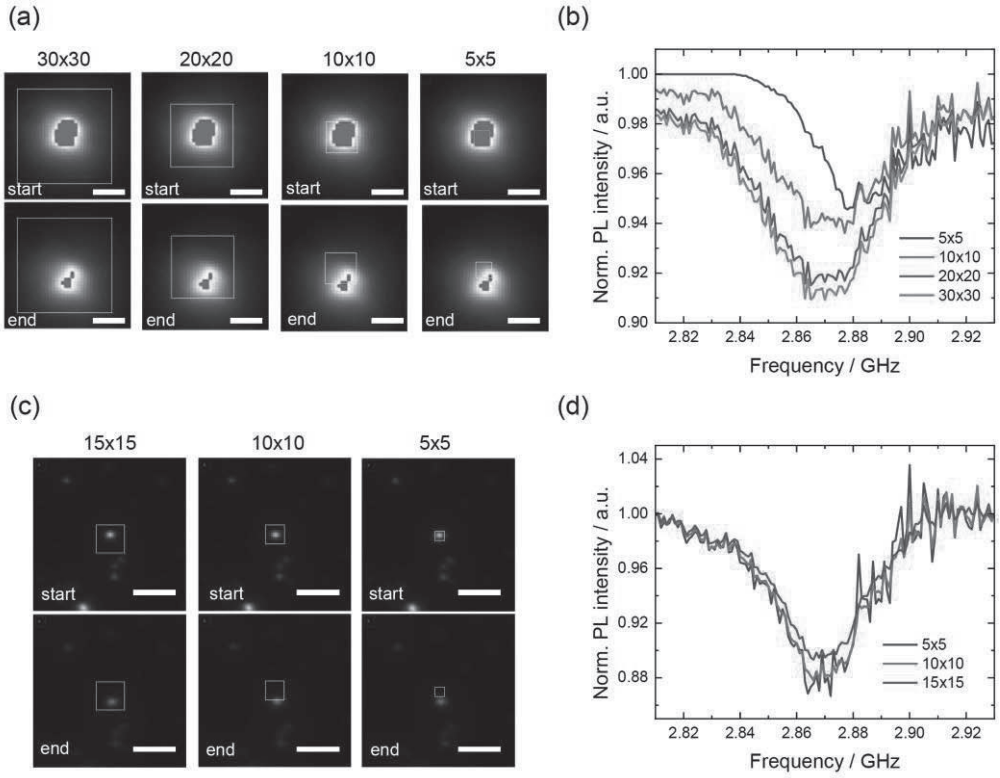


図5：(a) 非常に明るい蛍光NDを観察した場合の、関心領域（ROI）とODMR測定中の輝点の位置関係。StartがODMR測定開始時点。EndはODMR測定終了時点（約6分後）。スケールバーは2 μm。(b) 異なるROIで抽出したODMRスペクトル。(c) カメラの飽和強度以下の明るさの蛍光NDを観察した場合の、関心領域（ROI）とODMR測定中の輝点の位置関係。スケールバーは5 μm。(d) 異なるROIで抽出したODMRスペクトルROIと輝点の位置関係。

した場合のODMRスペクトル変化である．この時のODMR測定には約6分間かかったが，高倍率観察のために，蛍光NDがその間ドリフトしていくのが分かる．30×30，20×20，10×10，および5×5ピクセルとROIが小さくなると，ドリフトした蛍光NDは移動して，場合によってはROI外に出てしまう．これに応じてODMRスペクトルは，コントラストが低下し，中心周波数がシフトするようなアーティファクトが生じる．カメラの飽和はマイクロ波照射によって引き起こされるODMR現象の見かけ上の大きさを小さく見積もってしまうために，コントラストの低下を招くことが示された．輝点の光強度がカメラピクセルの飽和を引き起こさないように調整することも重要であることが分かった．図5(c)，(d)は，飽和していない状態での蛍光NDの画像と対応するODMRスペクトルである． 飽和がないために，ODMRスペクトルの形状そのものには変化がないものの，蛍光スポットがROI内に留まらないため，特に高周波側でかなりのノイズが発生した．このような広視野ODMR測定特有の問題を詳細に解析することで，実用化に向けた指針を検討する重要データを得た．

### ３．２　アンテナ形状の設計

ポリマーナノ構造中の温度計測を行うためには，設計したナノデバイス中で蛍光 ND が設計通りの ODMR 信号を示す必要がある．そのために，我々は，光観察とマイクロ波照射がチップ上で可能なデバイスを設計・開発した．まず，有限要素法による数値計算を用いて，ガラス基板上にマイクロ波アンテナパターンを設計した．その設計をフォトリソグラフィによってガラス基板上に転写した．具体的な，アンテナパターンを図6に示す． アンテナは，テーパーによるインピーダンス変換がなされたノッチ型コプレーナ導波路として考えられる．設計周波数は，ダイヤモンドのODMR信号に利用する2.87 GHzである． 図6 (c) および (d) は，マイクロ波磁束密度|B|の空間パターンとSパラメータである[12]．このアンテナにおいて，磁束密度は，細い中心ワイヤー近傍では6 Gに達し，中央付近では0.3 Gの強度が1.5 mm以上の大きさで生成される．また，Sパラメータスペクトルは平坦で，

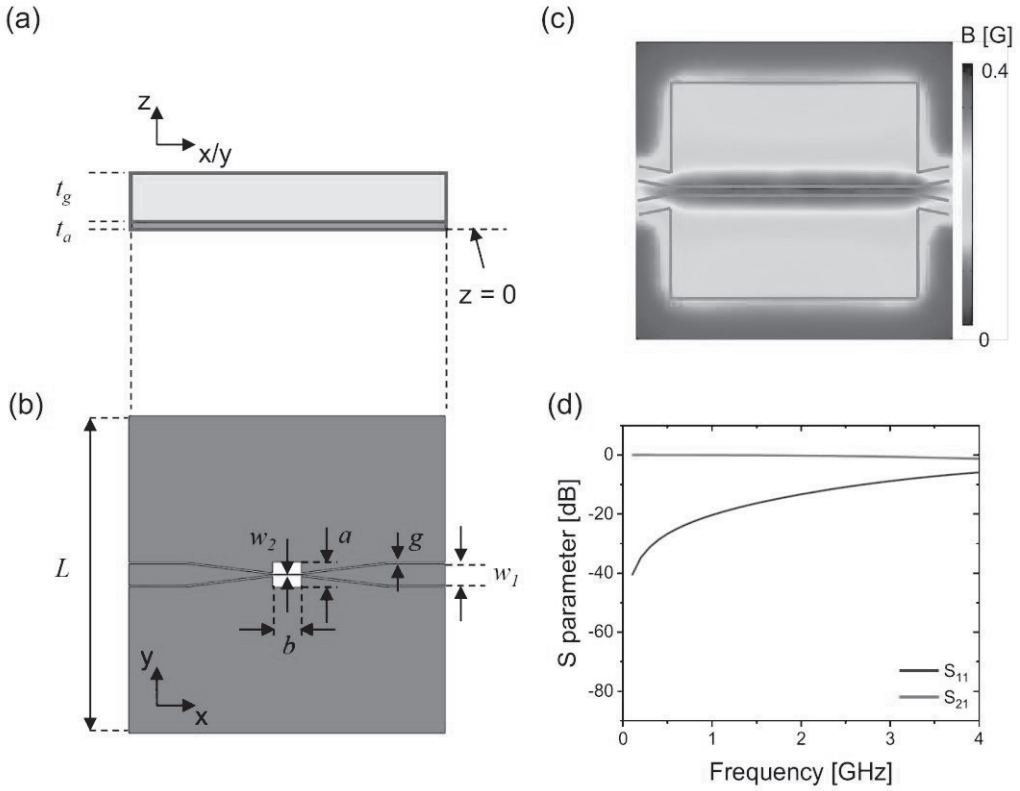


図6：(a)，(b) マイクロ波アンテナの構造図。$L$ = 22 mm, $w_1$ = 1.5 mm, $w_2$ = 50 μm, $a$ = 1.75 mm, $b$ = 2.0 mm, $t_g$= 0.17 mm, and $t_a$ = 100 nm. (c) 有限要素法によって計算した、2.87 GHz におけるマイクロ波磁束密度分布とSパラメータスペクトル。

広周波数帯域で利用可能である．その結果，ノッチ領域全体にわたるODMRの観測が可能である．詳細はここでは触れないが，このアンテナを用いることで，実際に予測通りのODMR強度がアンテナ各部で得られることが確認できた[20]．これは，デバイス内でのODMR強度を数値計算で定量的に予測した初めての成果である．ポリマーナノ構造温度計測においては，マイクロ波アンテナを含めてデバイス全体を設計して測定する必要がある．この際に，本数値計算による予測手法は極めて重要となる．

## 4．まとめ

２年間の研究期間を通して，上述のような蛍光ナノダイヤモンド温度計測技術の更なる向上を図ってきた．この技術を用いて，基板上のポリマー薄膜やそのナノ構造の温度を直接測定する取り組みを開始している．測定対象物に蛍光NDを導入するには蛍光NDの表面物性を調整する必要があり，その条件検討を現在行っている．これらに関しては，今後，公開発表していく予定である．

最後に本研究の今後について紹介する．この２年間の萌芽的な取り組みの結果，最近，国の研究プロジェクトとして実用化を目指した取り組みに採択された．このプロジェクトを通して，現代工業技術を支えるナノ温度計測として実用化を目指す所存である．マツダ財団には萌芽期の研究アイデアを具体的に実験させて頂けたことに心より感謝申し上げる．

## 5．謝辞

ここで紹介した研究は以下の方々との共同研究である．この場を借りて御礼申し上げる．岡山大学：Zou Yajuan助教，押味佳裕氏，井門勇太氏．大阪市立大学：手木芳男教授，首藤健氏．QST：西村勇姿博士．独国ベルリンフンボルト大学：Alexander Dohms氏，Nikola Sadzak氏，Oliver Benson教授．群馬大学：鹿野豊准教授．またこれらの研究に対する，日本学術振興会科学研究費補助金，文部科学省人材育成費補助金「卓越研究員事業」，大阪市立大学戦略的研究，日本医療研究開発機構，科学技術振興機構，住友財団，村田学術振興財団，渡辺財団からのご支援にも深く感謝する．

## 発表論文


[1] Hiroshi Yukawa, Masazumi Fujiwara, Kaori Kobayashi, Yuka Kumon, Kazu Miyaji, Yushi Nishimura, Keisuke Oshimi, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Takayuki Iwasaki, Mutsuko Hatano, Hideki Hashimoto and Yoshinobu Baba, Quantum thermometric sensing and analysis system using fluorescent nanodiamonds for the evaluation of the living stem cell function according to intracellular temperature, Nanoscale Adv. 2, 1859-1868, 2020年4月

[2] Masazumi Fujiwara, Simo Sun, Alexander Dohms, Yushi Nishimura, Ken Suto, Yuka Takezawa, Keisuke Oshimi, Li Zhao, Nikola Sadzak, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Naoki Komatsu, Oliver Benson, Yutaka Shikano, and Eriko Kage-Nakadai, Real-time nanodiamond thermometry probing in-vivo thermogenic responses, Sci. Adv. 6, eaba9636 2020年9月

[3] Masazumi Fujiwara, Alexander Dohms, Ken Suto, Yushi Nishimura, Keisuke Oshimi, Yoshio Teki, Kai Cai, Oliver Benson, and Yutaka Shikano, Real-time estimation of the optically detected magnetic resonance shift in diamond quantum thermometry toward biological applications, Phys. Rev. Research, 2, 043415, 2020年12月.

[4] Yushi Nishimura,Keisuke Oshimi,Yumi Umehara,Yuka Kumon, Kazu Miyaji,HiroshiYukawa,Yutaka Shikano,Tsutomu Matsubara,Masazumi Fujiwara,Yoshinobu Baba,&YoshioTeki, Wide-field fluorescent nanodiamond spin measurements toward real-time large-area intracellular thermometry, Sci. Rep. 11, 4248, 2021年2月.

[5] Masazumi Fujiwara and Yutaka Shikano, Diamond quantum thermometry: From foundations to applications, Nanotechnology 32, 482002, 2021年9月

[6] Yajuan Zou, Shinji Ito, Masazumi Fujiwara, and Naoki Komatsu, Probing the role of charged functional groups on nanoparticles grafted with polyglycerol in protein adsorption and cellular uptake, Adv. Funct. Mater. 2111077, 2022年1月


## 口頭発表


[7] 藤原正澄, S. Sun, A. Dohms, 西村勇姿, 首藤健, 竹澤有華, 押味佳裕, L. Zhao, N. Sadzak, 梅原有美, 手木芳男, 小松直樹, O. Benson, 鹿野豊, 中台（鹿毛）枝里子, 電子スピン共鳴融合型蛍光顕微鏡による線虫の in-vivo 温度計測, 日本顕微鏡学会第76回学術講演会, 3pmG_I8-12, 2020年5月

[8] 藤原正澄, Sun S, Dohms A, 西村勇姿, 首藤健, 竹澤有華, 押味佳裕, Zhao L, Sadzak N, 梅原有美, 手木芳男, 小松直樹, Benson O, 鹿野豊, 中台枝里子, 生体内リアルタイム蛍光ナノダイヤモンド温度計測, 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 8p-Z05-1-15, 2020年9月

[9] Masazumi Fujiwara, Nanodiamond quantum sensing and its application to biological thermometry, 2020 MRS Virtual Spring/Fall Meeting & Exhibit, S.NM01.07.02, 2020年11月

[10] 藤原正澄, Simo Sun, Alexander Dohms, 西村勇姿, 首藤　健, 竹澤有華, 押見佳裕, Li Zhao, Nikola Sadzak, 梅原有美, 手木芳男, 小松直樹, Oliver Benson, 鹿野　豊, 中台枝里子, 生体内リアルタイム蛍光ナノダイヤモンド温度計測, 量子情報技術研究会（QIT）, 17, 2020年12月

[11] 藤原正澄, 蛍光ナノダイヤモンドによる温度計測, 量子生命科学会第2回大会, P12, 2020年12月

[12] 押味 佳裕, 西村 勇姿, 田中 益明, 仕幸 英治, 松原 勤, 藤原 正澄, 手木 芳男, 広領域マイクロ波照射が可能な細胞培養ディッシュの開発, 量子生命科学会第2回大会, P3C, 2020年12月

[13] 押味 佳裕, 西村 勇姿, 仕幸 英治, 竹澤 有華, 中台 枝里子, 藤原 正澄, 手木 芳男, 広領域でナノダイヤモンドのNV中心の光検出磁気共鳴が可能なアンテナ一体型ディッシュの開発, 第68回春季応用物理学会春季学術講演会, 18p-Z13-11, 2021年3月

[14] Masazumi Fujiwara, Simo Sun, Alexander Dohms, Yushi Nishimura, Ken Suto, Yuka Takezawa, Keisuke Oshimi, Li Zhao, Nikola Sadzak, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Naoki Komatsu, Oliver Benson, Yutaka Shikano, and Eriko Kage-Nakadai, Real-time nanodiamond thermometry probing in vivo thermogenic responses, SPIE Photonics West 2021, 11700-113, 2021年3月

[15] 藤原正澄, A. Dohms, 首藤健, 西村勇姿, 押味佳裕, 手木芳男, 蔡凱, O. Benson, 鹿野豊, ダイヤモンドＮＶ中心の電子スピン共鳴周波数 が示す光強度依存性とセンシングにおけるアーティファクト, 日本物理学会第 76 回年次大会（2021年）, 13pA1-3, 2021年3月

[16] 藤原正澄, 蛍光ナノダイヤモンド量子センサの温度計測と生体計測応用, 第68回応用物理学会春季学術講演会, 17p-Z10-2, 2021年3月

[17] Masazumi Fujiwara, Simo Sun, Alexander Dohms, Yushi Nishimura, Ken Suto, Yuka Takezawa, Keisuke Oshimi, Li Zhao, Nikola Sadzak, Yumi Umehara, Yoshio Teki, Naoki Komatsu, Oliver Benson, Yutaka Shikano, and Eriko Kage-Nakadai, Real-time nanodiamond thermometry probing nematode worms, International Conference on New Diamond and Nano Carbons, II-10-3, 2021年6月

[18] Keisuke Oshimi, Yushi Nishimura, Eiji Shikoh, Yuka Takezawa, Eriko Kage-Nakadai, Masazumi Fujiwara, Yoshio Teki, Antenna-integrated culture dishes for 10-mm-scale large-area detection of optically detected magnetic resonance of nanodiamond NV centers, 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021, 8A-21, 2021年6月

[19] 押味佳裕, ナノ粒子を用いた細胞内温度の計測と制御～温度不均一性と生命活動の観点から～, Brainstorming 2021, 2021年8月

[20] 押味佳裕, ナノ粒子を用いた細胞内温度の計測と制御～温度不均一性と生命活動の観点から～, 複雑生命系秩序懇談会, 2021年8月

[21] 藤原正澄, 細胞機能を説明するための物理学（物理化学）的課題, 複雑生命系秩序懇談会, 2021年8月

[22] 藤原正澄, ダイヤモンド量子センサを用いた温度計測に関する考察, 量子生命科学会第3回大会, P31, 2021年9月

[23] 藤原正澄, 蛍光ナノダイヤモンド量子センサの温度計測と生体計測応用, Biothermology Workshop 2021, 2021年12月

[24] 藤原正澄, 蛍光ナノダイヤモンドの光スピン計測と生体分析への応用, 光応用光学特別研究会, 2022年2月

## 受賞

[25] 藤原正澄, 2020年度大阪市立大学　若手研究者奨励賞（南部陽一郎記念奨励賞）（2020年11月）

## 参考文献


(1) J.-H. Kim, Y. Koo, W. Song, S. J. Hong, On-Wafer Temperature Monitoring Sensor for Condition Monitoring of Repaired Electrostatic Chuck. Electronics 2022, 11, 880.

(2) C. Shi, V. Andino-Pavlovsky, S. A. Lee, T. Costa, J. Elloian, E. E. Konofagou and K. L. Shepard, Sci. Adv. 7, eabf6312 (2021).

(3) J. Christofferson and A. Shakouri, Microelectronics J. 35, 791 (2004).

(4) M. R. Abel, T. L. Wright, E. O. Sunden, S. Graham, W. P. King and M. J. Lance, Semiconductor Thermal Measurement and Management IEEE Twenty First Annual IEEE Symposium, 2005, pp. 235-242.

(5) X. D. Chen, C.-H. Dong, F.-W. Sun, C.-L. Zou, J.-M. Cui, Z.-F. Han, and G.-C. Guo, Appl. Phys. Lett. 99, 161903 (2011).

(6) G. Q. Liu, X. Feng, N. Wang, Q. Li and Ren-Bao Liu, Nat. Commun. 10, 1344 (2019).

(7) Simpson et al., ACS Nano 11, 12077 (2017).

(8) G. Kucsko, P. C. Maurer, N. Y. Yao, M. Kubo, H. J. Noh, P. K. Lo, H. Park and M. D. Lukin, Nature 500, 54 (2013).

(9) Y.-K. Tzeng et al., Nano Lett. 15, 3945 (2015).

(10) Y. Matsuzaki, H. Morishita, T. Shimooka, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. Munro, H. Yamaguchi, N. Mizuochi, S. Saito, J. Phys. Condens. Matter 28, 275302 (2016).

(11) M. Fujiwara, K. Yoshida, T. Noda, H. Takashima, A. W. Schell, N. Mizuochi, and S. Takeuchi, Nanotechnology 27, 455202 (2016).

(12) D. M. Pozar, Microwave Engineering, John wiley & sons, 3rd ed., (2005).