

2.3.7 量子計測・センシング

(1) 研究開発領域の定義

量子力学が記述する電子や光子などが持つ性質（量子性）を積極的に活用して、古典系では実現できない高感度な計測・センシング技術を開発するための領域である。個々の量子や原子集団全体の量子状態を制御しプローブとして用いるもの、複数の量子の相関状態（量子もつれ）や量子干渉を制御するものがあり、その計測・センシング対象も多様である。対象量子系の例としては、冷却原子、原子イオン、ダイヤモンドNVセンター、極低温電子回路、（偏極）核スピン、電子スピン、光子があげられる。

(2) キーワード

量子計測、量子センシング、精密分光、量子生命科学、原子時計、光格子時計、量子慣性センサ、量子ジャイロスコープ、量子もつれ光、超偏極、動的核偏極（DNP）、冷却原子、ダイヤモンドNVセンター、ナノ粒子、周波数標準、光子検出器

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

計測・センシングは、あらゆる科学技術の基盤であり、またSociety 5.0においても、現実世界をデータ化し、サイバー世界と融合させるのに不可欠な技術である。従来の光や電気を用いた計測技術における感度や分解能などの限界を、個々の光子、電子や原子の量子状態を制御することで、打ち破ることが可能になる。その要素技術や基盤となる理論は、量子コンピュータや量子通信などの研究とも密接に関連しており、それらの研究分野の進展にともない、量子計測センシング分野の研究は著しく進展している。実現可能性の高さや、そのアプリケーションの多様さから、科学技術・社会に与える波及効果も大きい。例えば光格子時計は、現在の時間標準として使われているセシウム原子時計を2桁も上回る高い時間精度を持つ。その高い精度のおかげで、時間の進み方が重力の大きさに応じて変わるというアインシュタインの一般相対性理論の効果を、地上わずか1 cmの高さの違いでも検出可能である。そのため、光格子時計は地殻変動、火山活動の観測等への応用が検討されている。衛星からの電波に依存した位置標定システムであるGPSを補完する技術として期待されるのが、量子慣性センサである。加速度計、ジャイロスコープ、重力勾配計など複数の慣性センサを統合することで、衛星からの信号に頼らず自律して位置を把握することができる（慣性航法）。衛星からの電波が届かない海中での作業において真価を発揮するため、排他的経済水域（EEZ）や北極海における資源探査上、極めて有用とされている。慣性航法の精度を律速しているのはジャイロスコープであり、量子技術を用いてその性能を高めることで精度を飛躍的に向上できると期待されている。炭素原子で構成されるダイヤモンドの一部が窒素原子で置換されて形成されたダイヤモンド窒素空孔（Nitrogen Vacancy：NV）センターは、磁場、電場、温度、圧力などの高感度センサとして、工学、医学、生命科学分野など、広範な分野での応用が期待されている。光あるいは物質の量子もつれを利用する量子もつれセンシングは古典技術では実現不可能な高いセンシング能力が約束されており、研究開発が進められている。医療、生命科学分野での応用開発が進められているのが超偏極イメージング技術である。現在主流となっているポジトロン断層法（PET）などの核医学検査は被曝リスクを伴うため、被曝リスクのない超偏極イメージングへの期待は高い。

[研究開発の動向]

• 光格子時計、量子慣性センサ

2001年の光格子時計の提案以降、その研究開発は日本をはじめとして、欧米、アジア各国の計量標準研究所など20以上の研究拠点に波及し、高精度化に向けた基礎研究が進められている。2016年には、日米の研究機関で提案当初の目標であった18桁精度が実現され、現在の研究開発は、基礎研究から時計の応用・実用化へと広がっている。

実用化に向けた技術開発として、各研究機関で開発された時計をつなぐ光ファイバ網の構築が進められている。特に欧州圏では、各国の標準研究所をつなぐ数1000 kmにわたる光ファイバ網の整備が進められ、ドイツ、フランス、英国、イタリアの標準研究所が光ファイバを介して互いの時計を比較できる状況が整いつつある。このような時計のネットワーク化は、開発した時計の再現性の確認や時間情報の共有、相対論的測地による高精度な標高の体系を作るうえで重要である。

また、重力ポテンシャル計としての測地応用に向けて、実験室を離れた環境下でも安定に動作できる可搬型光格子時計の開発も進められている。ドイツ国立物理工学研究所(PTB)では、トレーラーに搭載した光格子時計を開発し、フランスとイタリアの国境の山中のトンネル内に光格子時計を運び、光ファイバでイタリア国立計量研究所(INRiM)の光格子時計とつないで、実験室外での時計比較の実証実験を行った。日本では、18桁精度の可搬型光格子時計を開発し、東京スカイツリーの地上階と展望階に設置し、一般相対性理論の検証実験を行った。時計の可搬化技術によって、例えば火山や地殻変動の測定など、実地に持ち込んで測定が可能となると、測地応用の用途が広がるものと期待される。

時計の各種主要部品の製品化も進められている。欧米のベンチャー企業では、光-光、光-マイクロ波間の周波数変換を担う光周波数コム(Menlo Systems(独)、TOPTICA Photonics(独)、IMRA America(米))や原子冷却用光源(TOPTICA Photonics(独)、MOGLabs(豪))、分光用超狭線幅レーザ光源(Stable Laser Systems(米)、Menlo Systems(独))、光ファイバ周波数伝送装置(Muquans(仏))、レーザー光源、原子減速用真空槽(AOSense(米))等の製品化が行われている。

光格子時計による「秒」の再定義に向けた動向として、光格子時計で時刻標準を生成する取り組みも行われている。今後、このような活動とともに、光格子時計の再現性が多くの拠点で確認され、信頼性が高められることにより、光格子時計による「秒」の再定義の議論はより加速するものと期待される。

量子技術を利用したジャイロスコープとしては、スピンの歳差運動を用いたNMR型や原子波干渉型などがあるが、感度という観点では後者が圧倒的に高い性能を示す。古典のジャイロスコープでは、EEZや北極海における資源探査に必要な精度が実現できておらず、量子技術の導入が必須と考えられている。米国スタンフォード大学で開発された熱原子ビーム干渉型も、仏国LNE-SYRTEで実現された冷却原子噴泉型も、現時点ではロシア製の古典ジャイロスコープの性能に劣る状況にある。しかし、今後性能が飛躍的に向上する可能性があり、古典ジャイロスコープを上回る性能の実現が期待される。

航法研究においては、乗り物のダイナミクスを考慮する必要があるため、加速度耐性、ダイナミックレンジ、バンド幅といった、時計研究とは異なる観点からの性能が求められる。中性原子を用いた干渉計は加速度と角速度の双方に応答してしまうため、これらを切り分ける技術をより改善していくことが不可欠である。この点については、大阪大学において微小空間にトラップされたイオンを対象とした量子ジャイロスコープの研究が進んでいる。このジャイロは乗り物の運動により加速度等が印加されても原理的に角速度計測に影響がない。

• ダイヤモンドNVセンター

単一ダイヤモンドNVセンターの光検出磁気共鳴 (Optically Detected Magnetic Resonance : ODMR) が1997年に初めて報告されてから、二十数年にわたりドイツと米国を中心に、政府投資による基礎研究が強力に進められ、磁場、電場、温度、圧力、pH、などのセンシングにおいて従来技術 (超伝導量子干渉計 (SQUID) 磁気センサ、光ポンピング (OPM) 磁気センサ、蛍光分子イメージング、高速AFM、等) を凌ぐ可能性が見出された。NVision、SQUTEC、QNAMI、QZABRE、Quantum Diamond Technologies Inc. など、基礎的な知財を押さえたうえで当該分野の先駆者を擁するスタートアップが多数立ち上がっており、今後数年のうちに市場が確立されていくと考えられる。中国は10年近く前からNVセンターの研究を本格的に実施している。日本では、筑波大学や産業技術総合研究所が材料面において、当該分野の発展に大きく貢献してきた。また最近、ダイヤモンドの表面近傍に配置したNVセンターにより、ダイヤモンド基板上の分子の核磁気共鳴 (NMR) 分光にも成功しており、マイクロ領域での分子構造化学を開拓する基礎分析ツールになると期待されている。また、Qdyne (quantum heterodyne) 法などの新規な計測プロトコルについても開発が進み、高い周波数分解能でNMR信号を観測することが可能であることが実証された。

生命現象や細胞内環境を精密計測するための超高感度センサとしてダイヤモンドナノ粒子が注目を集めている。近年ナノダイヤに関して、数ナノメートル程度の直径を持つナノ粒子によるさまざまなセンシング機能の発現が報告されていて、例えば、pHや温度の量子計測が実証されてきており、今後の生命科学応用へ期待される。

• 量子もつれセンシング

量子もつれセンシングは、80年代の量子もつれの検証実験、ボーズ-アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現、また90年代からの量子情報通信処理研究・技術の進展とともに急速に発展してきた。2000年代以降、米国では国防省陸軍研究局 (DOD)、陸軍研究局 (ARO)、高等研究計画局 (DARPA) による投資と研究の進展がみられた。その応用としては、2000年頃に量子光干渉断層像 (量子OCT) が提案され、また2000年代中頃に量子イルミネーションが提案された。わが国においては、2007年に北海道大学から位相測定標準量子限界を超える多光子もつれ干渉の実験が、また2013年にそれを応用した量子もつれ顕微鏡が報告されている。また、2015年には、超広帯域量子もつれ光源を利用し、量子OCTで世界最高の0.54 μm 分解能 (空気中) に相当する2光子干渉縞の取得が報告されている。

• 超偏極NMR/MRI

核スピンの偏極率 (NMR/MRI信号強度に比例) を一時的に数万倍にすることで、 ^{13}C や ^{129}Xe 等の安定同位体核の超高感度計測を実現する量子センシング技術である。1990年代から超偏極寿命が長い核スピンを対象に、生体外で励起装置を用いて強力で超偏極誘導し、すぐに検体に投与してMRI撮像を行う新しいイメージング技術が生まれ、現在でも主流となっている。最初の試みは光ポンピングにより励起した ^3He や ^{129}Xe など希ガスの超偏極MRIである。欧米や中国で肺疾患を対象とする臨床応用が進んでいる。

2003年にスウェーデンのグループが、水溶性物質を動的核偏極 (DNP) で高感度化させてから水溶液に溶解させるdissolution DNP (dDNP) 法を開発し、 ^{13}C NMR信号を1万倍以上増幅することに成功した。この発見を機に、安定同位体元素を超偏極誘導することで、PET等の核医学検査に代わる放射線被曝の無い安全な分子イメージング診断につなげる研究が世界中で始められた。2013年にはカリフォルニア大学サンフランシスコ校 (UCSF) で世界初の臨床試験が前立腺がん診断で実施された。現在、世界23カ所以上に、

米国GEヘルスケア社が開発した臨床研究に使える¹³C励起装置が導入されており、世界10カ所程で数百人規模の臨床試験が進められている。脳腫瘍、乳がん、膵臓がんを含む多くのがん診断や心筋梗塞や糖尿病性心筋症などの心機能評価へと適用拡大が急速に進んでいる。一方、日本国内には臨床研究に使用可能な、医薬品製造の基準（GMP）に対応した¹³C励起装置は導入実績が無く、開発競争で致命的な遅れを取っている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

• 光格子時計高安定化に向けた研究への注目

時計を用いて時間、周波数計測を行う際、いかに短時間でリアルタイムに高精度な測定を行えるかを示す安定度も重要な要素となる。光格子時計は、多数の原子を同時に観測することで高い安定度を実現できる。しかし実際には、時計遷移を励起するためのレーザ光の周波数ノイズにより、光格子時計本来の高安定度が実現できない。レーザ光の不安定性は、参照する光共振器のミラーの熱雑音に起因するため、これを抑えるために、長い共振器や低温シリコン共振器を導入して高い安定度が実現されている。一方で、これらは装置の大型化を招き、時計装置の可搬化の障害となっている。そこで近年、光共振器に頼らずに原子のコヒーレンス等を有効に利用する新たな時計の高安定化の研究が注目されている。例えば、光格子中の原子集団からの超放射の利用、原子の非破壊観測、時計の無駄時間無し連続動作、アクティブ時計、スピンスクイーミングの実現等の試みがなされている。このような光格子時計の高安定度化は、今後の重要な研究テーマである。

• 量子もつれ光を用いる赤外量子吸収分光への注目の高まり

2つのもつれ光源における量子もつれ光子対生成過程間の量子干渉を利用することで、高額な赤外領域の検出器を使わずに、可視の光源と検出器のみで赤外領域の吸収分光測定が実現できる。2016年にシンガポールのグループが発表した後、ドイツ、オーストリア、英国、スペインなど欧州諸国で研究が開始された。ドイツでは産学連携を担うフラウンホーファー研究所が中心となって取り組んでいる。国内でも、Q-LEAPプロジェクトの1つとして、これまでの大強度量子もつれ光源開発の強みを活かす特長ある研究が、産学連携の枠組みで進められている。

• dDNP技術開発のさらなる進展

dDNP技術では6～10 Tへの更なる高磁場化に加えて、偏極源であるラジカル剤からまず¹H核に偏極を移し、続いて¹Hから¹³Cへと移すCross-Polarizationにより50%以上の¹³C偏極率を20～30分の短時間で得られる技術が開発されている。第2世代のdDNP型臨床機にはこの技術が採用され利便性が大幅に改善されると見込まれる。dDNPで励起された分子の超偏極寿命は数分と短いため臨床応用のネックとなっているが、東京大学のグループが開発した¹⁵N標記分子では1時間以上の長時間観測に成功している。また、事前に励起さえ始めておけば、ルーチンの形態像撮影にプラス5分で超偏極¹³C MRIによる分子イメージングを追加できる診断プロトコルが米国で整備され、今後10年で核医学検査から被曝の無い超偏極¹³C MRI診断への切り替えが進むものと考えられる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

[日本]

量子科学技術（光・量子技術）を駆使して非連続的な解決（quantum leap）をめざす「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」が2018年から10年の予定で実施されている。3つの領域のうちの1つである量子計測・センシング技術領域では、主にダイヤモンドNVセンターを用いたFlagshipプロジェクト（課

題名「固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出」が発足し、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発がターゲットとなっている。さらに、量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究など、7件の基礎基盤研究が推進されている。新たに量子生命科学研究のFlagshipプロジェクト（課題名「量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新」）が2020年に発足し、生体ナノ量子センサ、超高感度MRI/NMR、量子論的生命現象の解明・模倣の3つを対象とした研究開発が10年間の予定で行われる。

JSTでは、さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」が発足し、一部のテーマでNVセンターを用いた研究が進められている（2017年度～2022年度）。未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」（2017年～）、「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」（2018年～）が進められている。2020年に、大学などを中核とした産学連携を推進するためのプログラムである、JST共創の場支援プログラム 本格型 政策重点分野「量子航法科学技術拠点」が開始した。

AMED先端計測プログラムの支援により北海道大学とベンチャー企業である日本レドックスの共同開発により純国産のPHIP型¹³C励起装置の製品化が進められている。2021年度中にまず小動物イメージング用装置として国内販売が予定されており、今後の海外市場への進出と臨床機の開発が期待される。

[欧州]

光格子時計の実用化に向けたプロジェクトが立ち上がっている。欧州で進められているEuropean Quantum FlagshipのIntegrated Quantum Clock (iqClock) プロジェクトでは、光格子時計の可搬化と製品化および超放射レーザーの開発を進めている。英国のバーミンガム大学は企業と共同で小型Sr光格子時計の開発、オランダのアムステルダム大学、デンマークのニールスボーア研究所、ポーランドのニコラスコペルニクス大学、オーストリアのウィーン工科大学、インスブルック大学は、Sr原子を用いた超放射レーザーの開発を進めている。プロジェクトには、TELEDYNE e2V、TOPTICA Photonics、NKT Photonicsなどの企業が協力している。英国のQuantum Technology Hub コンソーシアムでは、量子センサの実用化技術開発の一環として、バーミンガム大学のグループが、Sr光格子時計の小型化、可搬化に向けた開発を行っている。欧州宇宙機関（ESA）では、マイクロ波時計を用いたプロジェクト（ACES）の後継として、光時計の宇宙利用（Space Optical Clocks：SOC）のため、光格子時計の国際宇宙ステーション搭載に向けたプロジェクトを2007年より進めている。

ダイヤモンドNVセンターのプロジェクトとして、ASTERIQS（Advancing Science and Technology through diamond Quantum Sensing）が、2018年からの3年間（予算1千万ユーロ）の予定で進められている。ダイヤモンドNVセンターによるナノレベル高空間分解能磁気センサ、電池モニタリングシステム開発、小型NMRなどの開発が進む。また、dDNPに代わる新技術確立に向けて、ダイヤモンドNVセンターの核スピン超偏極イメージングへの応用をめざす2つのプロジェクト、MetaboliQsとHYPERDIAMONDが立ち上がり、脱・核医学の動きがさらに加速している。

フランス・イノベーション省（MESRI）が量子国家戦略を2021年1月に発表した。7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する予定であり、その中の1分野が、量子センサ技術の応用開発（総投資額2億5800万ユーロ）である。

(5) 科学技術的課題

現在の光格子時計は、すでに社会実装されているマイクロ波時計と比べて装置が大型、煩雑かつ長期安定動作が難しく、それらをいかに小型化・堅牢化するかが重要な課題である。時計を動作させるには、複数台

のレーザを高精度かつ長期間安定に制御する必要がある。今後、レーザ開発や製品化に特化した企業の技術力の導入が重要となってくる。また、光格子時計のネットワーク化においては、実現した高精度な時間、周波数情報をいかに劣化させずに共有できるかが課題となる。従来の衛星を介したマイクロ波周波数伝送では大気の影響等の影響により精度、安定度の面で不十分である。一方、光ファイバ周波数伝送に関しても、距離が延びるとともに伝送安定度が劣化するため、地球規模の大陸間長距離伝送に適用するのは難しい。今後、このような長距離伝送に耐えうる高精度な周波数伝送手法の開発が必要となる。

量子慣性センサ開発において、ダイナミックレンジやバンド幅に対する問題は、光格子時計開発よりも切実である。特にバンド幅は、原子波干渉を利用する限りにおいて、回避しがたい技術的難点である。そのため、乗り物などの実環境下で原子波干渉型ジャイロが動作したという実験報告はなく、これまで時計研究に行ってきたと同様の持続的投資が必須なのは間違いない。この問題点の解決には超高性能古典ジャイロと量子ジャイロとをハイブリッド化することが不可欠であり、すでに中国Wuhan Institute等でこうした研究が始まっている。

ダイヤモンドNVセンターを脳磁計などに応用するには、さらなる高感度化が不可欠である。計測技術の改善、および物質科学的改善によるアプローチの両方が必要と考えられる。計測技術的アプローチでは、環境からのノイズ低減のための量子プロトコル開発などがあげられる。物質科学的アプローチでは、ダイヤモンドのさらなる高品質化やNVセンターの効率的な生成技術開発などが考えられる。実用化の観点からは低価格化が重要であり、小型化、集積化技術開発が必要となる。ダイヤモンドの高速成長技術、大面積化などの研究開発も、長期的に取り組むべき今後の課題としてあげられる。

超偏極イメージングは3次元位置情報+スペクトル(代謝)情報+時間の5次元情報として得られることが多く、テンソル分解など高次元データの特徴を活かした情報処理技術や、実用に際して高次元の情報を直感的にわかりやすく表現・提示する技術の必要性が高まっている。また、臨床用MRI装置は通常¹H専用機であり、¹³Cなどの異核は撮像できない。オプションで多核対応できるMRI機種は現状全て海外メーカー品であり、国内メーカーのMRI装置を所有する病院では超偏極¹³C MRIは実施できない。今後、MRI装置の研究開発やインフラ整備が必要となる。

(6) その他の課題

欧米と比べて量子技術の人材が不足しており、中長期的な観点からは重要な課題と考えられる。量子計測・センシング分野の人材には、センサに関する知識や量子物理のほか、それを取り巻く材料科学、生命科学、情報工学等の幅広い知識の習得や、理論からシステム開発まで見渡せる力が必要である。量子技術、量子情報科学に興味をもつ学生は増えているにもかかわらず、体系的教育は満足にできておらず、大きな課題である。アカデミアのみならず、産業界においても人材の確保は重要な課題である。大学院生や博士研究員などの若手人材を育成し、本領域の将来を支える次世代リーダーを、すそ野を広げつつ養成する必要がある。今後、拡大が見込まれる量子技術市場において、早い段階から企業の関心を惹きつけ、新たな市場創生につなげるため、アカデミアと企業関係者との間で「量子技術」に関する最新技術と動向を共有することが重要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	Q-LEAP 量子計測・センシング領域や、新規Flagship「量子生命」、JSTさきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」など、複数のプロジェクトによって研究開発が進む。しかし加速度的に増えている海外の投資に比べると十分とはいえない。 日本初の技術である光格子時計では、光格子時計の実証実験と18桁の時計精度を実現した東京大学・理化学研究所を中心に、世界をリード。
	応用研究・開発	○	↗	東京大学・理化学研究所・島津製作所では、可搬型光格子時計を開発し、一般相対論検証実験を実現。未来社会創造事業でも、東京大学・理化学研究所を中心に、社会実装をめざし、小型・可搬型光格子時計の開発を行っている。 Q-LEAP量子計測・センシング技術領域のFlagshipプロジェクトでは、脳磁計などの医療応用や、電池やパワーデバイスの電流・温度をモニタリングするシステム開発が進む。量子もつれ光を利用したセンシングへの企業の関心は高まりつつあり、今後の発展が期待される。超偏極イメージングの開発競争で遅れたが、放射線科医を中心に国内での臨床試験をめざす動きがあり、状況打開を臨む機運は高まっている。
米国	基礎研究	◎	↗	光格子時計の開発では、JILA、NISTで世界トップレベルの時計精度を実現。ハーバード大学を中心に、ナノ粒子を用いた磁場計測や温度計測の実証研究などが進む。量子もつれ光を用いた研究では、メリーランド大学、ボストン大学、イリノイ州立大学、カリフォルニア州立大学アーバイン校、NISTなどに加え、カナダにも複数の拠点があり、北米地域で連携している。超偏極イメージング研究でも、UCSFなどを中心に、多くの研究機関が潤沢な予算のもと、新規レーザーや疾患モデル動物のイメージングなどで優れた研究成果が出ている。
	応用研究・開発	○	↗	DARPAのプロジェクトで、NISTなどのグループが光周波数コムを搭載した光時計を微細加工した基板上に実装するなど、チップスケール原子時計の開発が進む。AOSense、Stable Laser Systemsなどのベンチャー企業による時計の要素技術開発と製品化も行われている。ハーバード大学を中心に、神経電流のDC磁場の計測や、NVセンターのスピンをプローブとしたイメージング技術開発がさかん。ゴーストイメージングに関し、その原理を用いた画像処理システムが開発されている。超偏極 ¹²⁹ XeによるCOPDなどの肺疾患診断と、超偏極 ¹³ Cによる、がんおよび心筋症の診断で大規模臨床研究が進められ、臨床データを扱う共通プラットフォームや撮像プロトコルの整備も充実。
欧州	基礎研究	◎	↗	光格子時計の開発が各国の計量標準研究所を中心に行われ、各国の研究所間をつなぐ長距離光ファイバ網の構築が進められている。ダイヤモンドNVセンターの研究では、ドイツを中心に先駆的な研究がなされている。シュトゥットガルト大学では、AC磁場に関する世界最高感度900fTHz ^{-1/2} を達成している。核偏極イメージングでは、黎明期より研究領域の中核を担ってきた大学が多く、近年ではdDNP装置の性能と利便性を大幅に向上するCross-Polarization技術の発明など、革新的な技術を創出。
	応用研究・開発	◎	↗	iqClockプロジェクトでは、可搬型光格子時計の開発と製品化および超放射レーザーの開発が進む。欧州宇宙機関(ESA)では、光時計の宇宙利用のため、光格子時計の国際宇宙ステーションへの搭載に向けたプロジェクトが2007年より進む。ベンチャー企業による時計用レーザー光源とその周辺機器の製品化も進展。MetaboliQsとHYPERDIAMONDの2プロジェクトによる医療応用、ASTERIQSプロジェクトによる高性能センサ開発など、ダイヤモンドNVセンターの応用研究開発が進む。

2.3
俯瞰区分と研究開発領域
ICT・エレクトロニクス応用

中国	基礎研究	△	↗	中国計量科学研究院、中国科学院、華東師範大学で光格子時計の開発が進展。中国科技大学、香港中文大学で、磁場計測やタンパク質のスピンラベルに関する研究が進む。量子もつれ光源や、光子検出器に関する研究の質と量は近年著しく向上。 ¹²⁹ XeガスのMRIの報告が中国の研究機関からなされている。
	応用研究・開発	△	→	中国科学院で宇宙利用に向けたSr光格子時計の小型化に着手。 ¹²⁹ Xeガスによる肺疾患の診断は2018年から臨床応用が始まっている。
韓国	基礎研究	△	→	韓国標準科学研究院では、Yb光格子時計を開発。量子もつれ光を用いた基礎研究に関して、浦項工科大学が世界レベルの研究を実施。dDNPによる認知症の早期診断の可能性を示唆する成果など、著名な基礎研究成果が複数報告された。
	応用研究・開発	△	→	特筆すべき応用研究・開発はみられない。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ バイオ計測・診断デバイス (ナノテク・材料分野 2.2.3)
- ・ バイオイメージング (ナノテク・材料分野 2.2.4)
- ・ MEMS・センシングデバイス (ナノテク・材料分野 2.3.4)
- ・ ナノ・オペランド計測技術 (ナノテク・材料分野 2.6.3)

参考・引用文献

- 1) S. Bennetts, C. C. Chen, B. Pasquiou, and F. Schreck, "Steady-State Magne-to-Optical Trap with 100-Fold Improved Phase-Space Density", *Phys. Rev. Lett.* 119, no. 22 (2017) : 223202. doi : 10.1103/PhysRevLett.119.223202
- 2) B. Braverman, A. Kawasaki, E. Pedrozo-Penafiel, S. Colombo, C. Shu, Z. Li, E. Mendez, et al., "Near-Unitary Spin Squeezing in ¹⁷¹Yb", *Phys. Rev. Lett.* 122, no. 22 (2019) : 223203. doi : 10.1103/PhysRevLett.122.223203
- 3) G. Jacopo, S. Koller, S. Vogt, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat, H. Denker, et al., "Geodesy and Metrology with a Transportable Optical Clock", *Nature Phys.* 14, no. 5 (2018) : 437-41. doi : 10.1038/s41567-017-0042-3
- 4) S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, A. Al-Masoudi, S. Dorschner, S. Hafner, U. Sterr, and C. Lisdat, "Transportable Optical Lattice Clock with 7 × 10⁻¹⁷ Uncertainty", *Phys. Rev. Lett.* 118, no. 7 (2017) : 073601. doi : 10.1103/PhysRevLett.118.073601

- 5) G. E. Marti, R. B. Hutson, A. Goban, S. L. Campbell, N. Poli, and J. Ye, "Imaging Optical Frequencies with 100 μ Hz Precision and 1.1 μ m Resolution", *Phys. Rev. Lett.* 120, no. 10 (2018) : 103201. doi : 10.1103/PhysRevLett.120.103201
- 6) W. F. McGrew, X. Zhang, R. J. Fasano, S. A. Schaffer, K. Beloy, D. Nicolodi, R. C. Brown, et al., "Atomic Clock Performance Enabling Geodesy Below the Centimetre Level", *Nature* 564, no. 7734 (2018) : 87-90. doi : 10.1038/s41586-018-0738-2
- 7) T. L. Nicholson, S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti, B. J. Bloom, R. L. McNally, W. Zhang, et al., "Systematic Evaluation of an Atomic Clock at 2×10^{-18} Total Uncertainty", *Nature Commun.* 6 (2015) : 6896. doi : 10.1038/ncomms7896
- 8) F. Riehle, "Optical Clock Networks", *Nature Photon.* 11, no. 1 (2017) : 25-31. doi : 10.1038/nphoton.2016.235
- 9) M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai, and H. Katori, "Test of General Relativity by a Pair of Transportable Optical Lattice Clocks", *Nature Photon.* 14, no. 7 (2020) : 411-15. doi : 10.1038/s41566-020-0619-8
- 10) J. M. Boss, S. K. Cujia, J. Zopes, L. C. Degen, "Quantum sensing with arbitrary frequency resolution", *Science* 356, no. 6340 (2017) : 837-840. doi : 10.1126/science.aam7009
- 11) S. Schmitt et al., "Submillihertz magnetic spectroscopy performed with a nanoscale quantum sensor", *Science* 356, no. 6340 (2017) : 832-837. doi : 10.1126/science.aam5532
- 12) T. Ono, R. Okamoto, and S. Takeuchi, "An entanglement-enhanced microscope", *Nat. Commun.* 4 (2013) : 2426. doi : <https://doi.org/10.1038/ncomms3426>
- 13) S. Pirandola, B. R. Bardhan, T. Gehring, C. Weedbrook, and S. Lloyd, "Advances in photonic quantum sensing", *Nature Photon.* 12 (2018) : 724-733. doi : <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0301-6>
- 14) Z. J. Wang et al. "Hyperpolarized ^{13}C MRI : State of the Art and Future Directions", *Radiology* 291, no. 2 (2019) : 273-84. doi : 10.1148/radiol.2019182391
- 15) J. H. Ardenkjaer-Larsen. "On the Present and Future of Dissolution-DNP", *J. Magn. Reson.* 264 (2016) : 3-12. doi : 10.1016/j.jmr.2016.01.015
- 16) H. Nonaka et al. "Design of a ^{15}N Molecular Unit to Achieve Long Retention of Hyperpolarized Spin State", *Sci. Rep.* 7 (2017) : 40104. doi : 10.1038/srep40104
- 17) F. Reineri, T. Boi, and S. Aime, "Parahydrogen Induced Polarization of ^{13}C Carboxylate Res-onance in Acetate and Pyruvate", *Nat. Commun.* 6 (2015) : 5858. doi : 10.1038/ncomms6858
- 18) B. J. Tickner et al. "Optimisation of Pyruvate Hyperpolarisation Using SABRE by Tuning the Active Magnetisation Transfer Catalyst", *Catal. Sci. Technol.* 10, no. 5 (2020) : 1343-55. doi : 10.1039/c9cy02498k
- 19) L. Bordonali et al. "Parahydrogen Based NMR Hyperpolarisation Goes Micro : An Alveolus for Small Molecule Chemosensing", *Lab Chip* 19, no. 3 (2019) : 503-12. doi : 10.1039/c8lc01259h