

水の量子的性質とプロトントンネリング

武田 政樹

With o3 Deep Research

生成日時: 2025 年 06 月 30 日

水の量子的性質とプロトントンネリング

1. 序論

水は地球上の生命に不可欠な液体であり、物理・化学・生物・地球科学の各分野で中心的な役割を果たす。その重要性のみならず、液体水は数多くの異常な物性を示す点で特異な存在である。例えば、水は融解時に体積が減少し、高圧下で粘性が低下するほか、4℃付近に密度極大を示し、極めて高い表面張力を持つといった、通常の液体には見られない振る舞いを示す。これらの特性は水分子間の強い水素結合ネットワークによってもたらされており、水がこのような異常性を示さなかったならば地球上に生命が発達し得たか疑わしいとも指摘されている。

水の分子間相互作用は、単に古典的な静電引力だけでなく、電子の軌道の重なりやプロトンの共有など量子的な性質を帯びている。水素結合における電子電荷の共有やプロトンの挙動には量子力学的効果が深く関与しており、これらは理論計算によってその重要性が示唆されてきた。近年では実験技術の進展により、水の水素結合ネットワーク内で電子的・核的な量子効果を直接観測することも可能になりつつある。本論文では、水の特異な物性の背景とされる量子的側面、特にプロトン（陽子）のトンネリング現象に着目し、その生体内における役割や将来的な応用可能性、社会への影響について論じる。まず水の特異性を概観し、次に水に固有の量子的性質を論じる。続いて、生体システムでのプロトン輸送に関わる量子現象と、プロトントンネリングの制御・応用の可能性について考察し、最後に社会的インパクトと今後の課題を述べる。

2. 水の特異性

水が示す数多くの異常物性は、水分子同士が形成する水素結合ネットワークに起因している。水分子は四面体的に最大4つの水素結合を形成でき、これは単純な液体にはない方向性のある結合構造である。この独特の結合構造により、水は**密度の異常**（4℃で密度最大となり、それより低温で密度が減少する）、**氷の異常**（固体の水が液体水に浮く）、**熱力学的応答関数の異常**（過冷却で等温圧縮率や定圧熱容量が発散的挙動を示す）など、多様な特性を示す。これらの特異性を統一的に説明するために、水の局所構造が一樣ではなく低密度と高密度の二種類の構造が混在するという仮説（いわゆる水の二構造モデル）など、様々なモデルが提唱されてきた。未だ議論は続いているが、水の異常現象の背後にある水素結合ネットワークの構造と動的揺らぎを解明することが、水の科学における基本的課題となっている。

水の特異性を支える水素結合の強さや寿命は、温度や圧力によって変化し、その協同性が水のマクロな性質に反映される。例えば、水は常温付近では不均質な微視的構造のゆらぎを示し、それが温度低下とともに顕著になる可能性が示唆されている。このように水の特異な物性を理解するためには、単分子ではなく多数の水分子が相互作用する集団としての水を捉える必要がある。ここで量子論的視点を導入すると、水素結合の形成・切断やプロトンの移動といった現象において、従来の古典的描像では説明しきれない振る舞いが現れることが知られてきた。

3. 水の量子的性質

水分子間の相互作用や水素結合ネットワークには、核（プロトン）と電子の**量子的な挙動**が重要な役割を果たす。特に水素原子（プロトン）は質量が小さいため量子力学的な**ゼロ点振動**やトンネリング効果によって、その位置が確定的ではなく確率的に広がったり、エネルギー障壁を通り抜けたりする。この**核量子効果**は水の構造と性質に影響を及ぼし、重水（D₂O）と軽水（H₂O）で物性が微妙に異なる原因ともなっていると考えられる。実際、近年のスペクトル測定手法の発展により、水素結合ネットワーク内での電子の電荷移動やプロトンの量子的な振る舞いを直接観測

することが可能となり、水中の量子効果の寄与が実験的に検証されつつある。たとえば、相関振動分光法（CVS）と呼ばれる新手法では、水中で水素結合に関与する分子だけを選択的に測定し、水素結合に沿った電子電荷共有の程度や水素結合強度への核量子効果を定量化することに成功している。この研究では、水酸化物イオンやプロトンを加えて pH を変化させた際に、水素結合ネットワーク内でどの程度電子電荷が移動しプロトンが受け渡されているかが初めて測定され、水中の量子的な挙動を具体的な数値で示した。

量子力学の特筆すべき現象である**量子もつれ**について、水のような多体分子系で直接観測することは容易ではない。しかし、水分子集団の相関した動きが極めて協調的に現れる場合、それを量子もつれに喩えることもある。例えば、細胞内で高濃度のタンパク質に囲まれた水は、運動が遅くなるだけでなく離れたタンパク質同士の動作を媒介するような挙動を示し、研究者はこれを「生物学的な遠隔相互作用」、すなわち量子もつれのアナロジーと表現している。実際には水分子同士がエンタングルして操作可能な状態になるという意味ではないが、水の集団挙動が示す非直線的な相関は古典的な拡散モデルでは説明しづらく、この点でも量子論的解析の重要性が示唆される。

水における量子的性質の顕著な例として、**プロトンのトンネリング**現象が挙げられる。水素結合で連結した複数の水分子からなるクラスターでは、プロトンが一つの分子から別の分子へ、エネルギー障壁を乗り越えることなく量子力学的にトンネル効果で移動することがある。これは特に低温・真空下で顕著になり、水分子の環状クラスターである四量体（環状に4つの水分子が水素結合で繋がった構造）において、複数の水素結合に跨ってプロトンが**協奏的（同調的）**にトンネル移動する様子が走査型トンネル顕微鏡によって直接観測されている。この研究では、水の四量体が持つ水素結合ネットワークの手型（キラリティ）が、プロトンの集団的なトンネル移動によって右手型と左手型の間で可逆的に入れ替わる様子が確認された。単一のプロトンが独立にトンネルする従来型の現象（非協調的トンネリング）とは異なり、水素結合ネットワーク全体が**多体量子トンネリング**状態となっている点が特徴である。同様に、水の三量体（三角形に配列した3つの水分子）でも、各分子の回転運動がプロトンのトンネリングと連動し、3つのプロトンが協力してエネルギー障壁を乗り越える現象が報告されている。この実験では極低温下で塩化ナトリウム表面に固定した3つの水分子を STM で観察し、三角形の歪みが左右に高速振動する様子（プロトンの位置交換）を捉えており、量子トンネル効果が関与する証拠とされた。さらに STM の探針電圧を印加して水分子の回転運動を活性化すると、三角形の歪みが消失して正三角形に近づくことが確認され、これは回転運動により水素結合距離が調整され、プロトンの協奏トンネリングが促進された結果と解釈できる。以上のように、水分子集合体の中ではプロトンが量子的に振る舞う現象が存在し、水の特性理解には量子力学的描像が不可欠であることが明らかになってきている。

4. 生体内のプロトン輸送における量子現象

4.1 酵素におけるプロトンワイヤー機構

生体内では、水素イオン（プロトン）の移動が多くの生命現象の鍵を握っている。酵素反応においては、遠く離れた部位間でプロトンを受け渡す経路として**プロトンワイヤー**（連結した水素結合の鎖）が存在する例が知られている。典型的なのは、ピルビン酸デヒドロゲナーゼ複合体 E1 酵素で見出された**酸性アミノ酸残基のトンネル**である。フランクらの研究では、この酵素内に約 20 Å 離れた2つの活性部位を結ぶ水素結合ネットワークが発見され、グルタミン酸やアスパラギン酸が連なる経路をプロトンが行き来することで離れた活性部位同士の反応が同期化されることが示された^[1]。このプロトン伝達路（いわゆるプロトンワイヤー）は、一方の活性部位で生

成したプロトンをもう一方の補酵素（チアミン二リン酸；ThDP）へ迅速に送り届け、酵素の二量体構造における活性部位間コミュニケーションを可能にしている。酵素内のプロトンワイヤーは他の例でも提唱されており、例えばオキサロ酢酸デカルボキシラーゼや β -ラクタマーゼ等でも類似のプロトン移動ネットワークが議論されている。これらは**グロットフース機構**（Grotthuss 機構）と呼ばれる古典的プロトンホッピングの考え方を酵素内に拡張したものであり、水分子やイオン化したアミノ酸側鎖が連なった経路をプロトンがリレー的に跳び移ることで高速なプロトン輸送が実現している。

4.2 酵素反応におけるプロトンの量子トンネリング

酵素反応そのものの中でも、プロトン移動が量子トンネリングによって進行するケースが報告されている。マスグラウらの詳細な研究では、芳香族アミン脱水素酵素によるトリプタミンの酸化反応において、基質から酵素側へのプロトン移動（約 0.6 Å の距離）が生じる際、古典的な障壁通過では説明できない**量子トンネル効果**が主要な経路であることが示された^[2]。X 線結晶解析で中間体を同定し、トンネル効果を組み込んだ理論計算と速度論実験を組み合わせた結果、この酵素ではプロトン供与体と受容体の微小な距離変化（サブ Å オーダー）のみでトンネリングが促進され、酵素全体の大規模な構造変化を必要としないことが明らかとなった。これは、酵素がその活性部位を精密に調整することでプロトン移動障壁を実質的に低く保ち、**量子トンネリングに有利な環境**を整えている可能性を示唆する。この見解を裏付ける証拠の一つに、酵素の同位体効果の観測がある。例えば大腸菌ソイ豆リポキシゲナーゼ-1（SL0-1）による水素移動反応では、基質中の水素を重水素に置換すると反応速度定数が約 80 倍にも低下する（室温付近）ことが知られており^[6]、これは単純な遷移状態理論では説明困難である。さらに SL0-1 では反応の活性化エネルギーが極めて小さく温度依存性が弱いという特徴も観測されており、これらは**プロトン移動がトンネル効果に支配されている**典型的な兆候である^[6]。SL0-1 の活性部位をわずかに改変した変異体では同位体効果の温度依存性が増大することも報告されており、タンパク質の微小な構造ゆらぎ（ゲーティング）がトンネリング確率を調節していることが示唆される。総じて、酵素は進化の過程で活性部位の構造を**量子的なプロトン移動**が起きやすいよう最適化している可能性があり、生命が量子効果を巧みに利用している例と言えるだろう。

4.3 膜内プロトンチャネルと水のワイヤー

生体膜に存在するプロトンチャネルやポンプも、プロトンの高速輸送に特化した仕組みを備えている。膜タンパク質の内部には疎水的な環境が広がるが、ところどころに配置された**水分子の鎖**（水素結合ネットワーク）や極性アミノ酸からなる経路がプロトンの通り道となる。例えば、バクテリオロドプシンや細胞呼吸鎖複合体のプロトンポンプでは、タンパク質内部に複数の水分子とアミノ酸側鎖が水素結合で連結したルートが見つかっており、光や酸化還元反応によって引き起こされるタンパク質の構造変化に同期してプロトンがその経路をホップ伝導すると考えられている。これら**水のワイヤー**は断続的に形成と崩壊を繰り返す一時的な構造である場合も多く、直接観測は難しいが、分子動力学シミュレーションからは数個の水分子が一直線に並んだ強い水素結合鎖が形成されるとプロトンがその鎖に沿って優先的に移動することが示されている^[3]。また、人工的に設計されたチャネルタンパク質でも、水素結合ネットワークがプロトン選択的な輸送経路として機能する例が報告されている。近年の研究では、疎水的な膜孔の内部に瞬間的に出現する「水の鎖」が H^+ のみを通すフィルターとして働くことが明らかになり、これが酸と塩基のシャトル機構や生体のエネルギー変換効率に寄与している可能性が示された。このように、水分子が作るプロトンチャネル内のワイヤー構造は、生体が高速かつ方向選択的なプロトン輸送を実現するための自然のソリューションであり、その挙動には量子的なプロトンホッピングが深く関与している。

4.4 DNA 塩基対内でのプロトン移動とトンネリング

プロトンの量子的挙動は、生命の遺伝情報を担う DNA 分子においても重要な意味を持つ可能性がある。DNA の塩基対（グアニン-シトシンやアデニン-チミン）では、2 本の水素結合によって塩基同士が結合しているが、時としてこの**二重水素結合**において両方のプロトンが同時に逆向きに移動し、珍しい**互変異性体**（タウトマー）を形成することがある。これは 1950 年代から予想されていた現象で、1963 年にはロー丁が量子力学的トンネル効果によって塩基対内のプロトン移動が起こりうることを指摘している〔⁴〕。長らくこのロー丁仮説は直接の検証が難しかったが、近年になって量子動力学の手法で DNA 塩基対内プロトン移動の速度論的影響が精査され始めた。スロコムらの最新の研究では、グアニン-シトシン塩基対のプロトン移動を**開放量子系モデル**で解析し、トンネル効果による移動速度が古典的な活性化越えよりも桁違いに速く、生理温度下でも無視できない頻度で塩基対が互変異性化する可能性を示した〔⁵〕。具体的には、量子トンネル効果を取り入れると G-C 塩基対が標準形と異性体形との間でピコ秒～ナノ秒オーダーで平衡に達し、平衡状態で異性体形が占める割合は 10^{-4} 程度に達するとの結果が得られたという。この確率は従来予想より高く、DNA 複製時にも異性体形が残存すればミスペアを招いて突然変異の一因となりうる。しかし、生体内で実際に量子トンネルによる塩基対の異性化が突然変異頻度ほどの程度寄与しているかは未解明であり、酵素的な校正機構や DNA ポリメラーゼの選択性によって大部分の異性化は排除されている可能性も高い。今後、特殊な塩基対を導入した合成 DNA や高感度検出法を用いて、量子的プロトン移動が遺伝情報の誤りに直結するか検証する研究が望まれる。

4.5 量子生物学的観点と今後の展望

以上に述べたように、酵素触媒作用から DNA のミューテーションに至るまで、生体内のプロトン移動には量子力学的効果が深く関与している可能性が高い。これらの現象は長らく暗黙のうちに古典論で扱われてきたが、近年の研究によって生命現象を**量子の揺らぎの上に位置付ける**視点が現実味を帯びてきたと言える。もっとも、生命システムが量子効果を意図的かつ積極的に利用しているのか、それとも環境のノイズに紛れながら副次的に量子現象が起きているだけなのかについては議論が続いている。酵素の例では、活性部位がトンネリングを促進するような高密度の配座を取ることで反応速度を上げていると解釈でき、進化が量子効果を取り入れた可能性を示唆する。一方、DNA のプロトントンネリングは有害な突然変異に繋がりうるため、生物はこれを抑制・修正する仕組みを発達させてきたとも考えられる。いずれにせよ、**量子生物学**という学際領域において、水やプロトンの量子的性質が生命現象にどう影響しているかを解明する試みは始まったばかりである。今後、室温での超高速分光や単分子観測技術が進歩すれば、細胞内でプロトンがトンネリング移動する様子を直接捉えるといった夢のような実験も現実になるかもしれない。それにより、生命の基本原理に量子論がどのように組み込まれているかが鮮明になれば、生物学と物理学を統合する新たなパラダイムが構築されるだろう。

〔¹〕: Frank, R. A. W. *et al.* (2004). 「A molecular switch and proton wire synchronize the active sites in thiamine enzymes」 *Science* **306**(5697): 872-876. DOI: 10.1126/science.1101030

〔²〕: Masgrau, L. *et al.* (2006). 「Atomic description of an enzyme reaction dominated by proton tunneling」 *Science* **312**(5771): 237-241. DOI: 10.1126/science.1126002

〔³〕: Cukierman, S. (2006). 「Et tu, Grotthuss! and other unfinished stories」 *Biochim. Biophys. Acta* **1757**(8): 876-885. DOI: 10.1016/j.bbabi.2005.12.001

[⁴]: Löwdin, P.-O. (1963). 「Proton tunneling in DNA and its biological implications」 *Rev. Mod. Phys.* **35**(3): 724-732. DOI: 10.1103/RevModPhys.35.724

[⁵]: Slocombe, L. *et al.* (2022). 「An open quantum systems approach to proton tunnelling in DNA」 *Commun. Phys.* **5**: 109. DOI: 10.1038/s42005-022-00881-8

[⁶]: Knapp, M. J., Rickert, K. & Klinman, J. P. (2002). 「Temperature-dependent isotope effects in soybean lipoxygenase-1: correlating hydrogen tunneling with protein dynamics」 *J. Am. Chem. Soc.* **124**(15): 3865-3874. DOI: 10.1021/ja012205t

5. プロトントンネリングと量子機械の可能性

5.1 水中プロトン核スピンを用いた量子ビット

プロトンの量子的挙動を制御・利用することは、新たな**量子テクノロジー**への応用可能性を秘めている。その一つのアイディアが、水中の**プロトン核スピン**を量子ビット (qubit) として活用する手法である。核磁気共鳴 (NMR) は比較的温和な条件で核スピンを操作できる技術として古くから知られているが、従来の NMR 量子計算ではスケーラビリティ (大規模化) が大きな課題であった。最近、韓国の研究チーム (Cho ら) は既存の医療用 MRI 装置を利用して多数の量子ビットを生成・操作するコンセプトを提案した[⁷]。彼らの手法では、MRI の空間勾配磁場を巧みに変調することで試料中に複数の局所領域を作り出し、それぞれの領域における水の ¹H 核スピンの異なる共鳴周波数を持つように設定する。これにより一つの試料内で互いにアドレス可能な多数の量子ビットを同時に実現できるとし、さらに MRI 技術で培われたパルスシーケンスやスピンのコヒーレンス制御手法 (スピン状態の純化やリセット法) を流用することで、高度な量子ゲート操作やエンタングル状態の生成も可能であると報告している[⁷]。このアプローチの利点は、極低温や真空を必要とせず**室温環境で量子情報処理**を行える点、および既存の巨大な MRI インフラとノウハウを活用できる点にある。仮にこの概念が実証されれば、病院に置かれている MRI 装置がそのまま量子コンピュータのハードウェアに転用できる可能性もあり、量子技術の普及を加速し得るユニークな方向性として注目される。

5.2 原子スケールでのプロトントンネリング制御

プロトンのトンネリング現象を外部から**原子スケールで制御**する試みも進展している。前述のように、水分子が環状に4つ繋がった**水の四量体**では、4つのプロトンが協奏的にトンネル移動してクラスター全体のキラリティ (手型) が反転する現象が観測された[⁸]。この実験では走査型トンネル顕微鏡 (STM) の探針先端に塩素イオン (Cl⁻) を付着させ、四量体クラスターに極微小な力学的攪乱を与えることで、プロトントンネリングの速度を変化させられることが示唆された[⁸]。具体的には、STM 先端をクラスターに非常に近づけ対称性を崩すと、それまで高速で起こっていた協奏的トンネリングが抑制され、逆に先端を特定の対称位置に配置するとトンネリングが再開する様子が観測されたという。この結果は、**プロトンの量子状態を原子レベルで操る**可能性を初めて示したものと言える。また、最近報告された**水の三量体**に関する研究では、STM の探針から水分子に電圧を印加して各分子の回転運動を活性化し、それに伴ってプロトントンネリングの協調性を制御することに成功している[⁹]。三角形配置の3つの水分子は通常いびつに歪んだ形 (左右いずれかに偏った異性構造) をとるが、STM 電圧によって分子が回転運動を始めると水素結合の距離が調整され、三量体が正三角形に近い対称形状へと変化した。これは**分子の協調回転**によって3つのプロトンが同時に障壁を乗り越えるトンネリングが促進されたことを意味し、

外部刺激によって量子トンネル現象をオンデマンドで制御できることを示している[⁹]。このような原子・分子スケールの実験的手法は、将来的に単一分子デバイスのスイッチング素子としてプロトンの位置の重ね合わせ状態（右回り・左回りの同時存在など）を利用する、といった応用にも繋がる可能性がある。

5.3 プロトンを用いた分子スイッチと量子デバイス

水素結合クラスターで実証されたプロトントンネリングの制御は、新たな**分子エレクトロニクス素子**の設計に道を開く。例えば、水の三量体におけるねじれの左右切り替え現象は、量子的なプロトンスイッチと言えるだろう。STM 電圧のオン・オフによりプロトンの集団移動を**停止・再開**できたという事実は、一種の分子スケール論理ビットの実装に他ならない。これを拡張すれば、特定の分子クラスターを利用した**プロトン型フリップフロップ回路**や**量子論的トランジスタ**を構築できる可能性がある。実際、四量体や三量体で観測されたようなプロトン配置の二値性（例えば右手型 vs 左手型）は情報の 0 と 1 に対応し得るし、その間の量子的な重ね合わせ状態は古典ビットでは表現できない計算能力を秘めている。また、プロトンは電子より約 1800 倍重い分子内粒子であるため、その取り扱いには電子とは異なる特徴が現れる。一般に重い粒子ほどデコヒーレンス（量子状態の崩壊）に対して敏感で操作が難しいという課題はあるが、一方で環境との相互作用を積極的に利用した**オープン量子系デバイス**の実装という観点では興味深い候補となる。例えば、プロトンが周囲の水素結合ネットワークと強く結合している性質を利用し、外部から微妙に環境条件（温度、電場など）を変化させることでデバイスの量子状態を読み書きする、といったコンセプトも考えられる。このようなプロトン駆動の分子デバイスはまだアイデア段階だが、量子コンピューティングやナノスケールセンシングへの新奇なアプローチとして将来的に展望が開けている。

5.4 触媒・エネルギー変換への量子効果応用

プロトントンネリングの制御技術は、量子計算以外にも**化学反応制御**や**エネルギー変換**の分野で応用が期待される。水素移動は有機化学反応や触媒作用の律速段階となることが多く、その量子論的扱いを巧みに導入すれば反応効率を飛躍的に高める余地がある。前述の水クラスター研究の著者らも、分子の協調運動とプロトン移動の関係性を解明したこの知見は、今後プロトン移動を伴う様々な化学プロセスの**反応速度を自在に制御**する新たな戦略につながり得ると指摘している[⁹]。例えば、酵素の活性中心に倣って人工触媒の活性部位周辺に水素結合ネットワークをデザインし、プロトンのトンネリングを促進することで触媒効率を高めるアプローチが考えられる。また、燃料電池のプロトン交換膜において、プロトンが水和クラスター内をホッピングする機構を強化すれば、低温でも高いプロトン伝導性を示す材料の開発につながる可能性がある。DNA 塩基対で見られるプロトントートメリズムに着想を得て、自己修復的に誤情報を訂正する**バイオメテック量子メモリ**の構想なども SF 的ではあるが論じられている。さらに大局的には、水の量子的性質の研究から得られた分光計測技術（例えば相関振動分光[²]）や解析手法は、溶液化学や生体分子科学全般に波及効果を持つ。こうした基礎技術の進歩が、新エネルギーや創薬の分野における材料評価や反応解析を支え、産業応用へと結びついていくことが期待される。

5.5 近未来における量子機械と量子脳応用の可能性

プロトン・水素結合・水分子クラスターを基盤とする量子デバイスの提案

水や水素結合が持つ量子特性を活かした新規デバイスが近未来の量子技術として注目されている。以下にプロトン、水素結合、水分子クラスターベースの量子デバイス応用の可能性を5つ提案する。

量子計算: 水素結合ネットワークにおける双安定的なプロトン配置やスピン状態を量子ビットに用いる構想である。最近の研究では、非共有結合（水素結合）でもスピン情報を通信できることが示され、分子スピン量子ビットの組み合わせによる多体状態（四重項）の生成に成功している。例えばペリレンジイミドとニトロキシドラジカルが水素結合で自己集合した系で光照射により2つのスピン中心が強く結合し四重項状態を形成できることが報告されており、水素結合を介したスピン量子ビット結合は量子計算への新たな材料設計指針となる〔¹〕。

量子センシング: 水素や水に由来するスピンや振動は高感度な量子センサーとして利用可能である。上記のような分子スピン量子ビットは量子スピントロニクスにおいて有望視されており、とくに高分子中に埋め込まれたラジカルスピンは磁場や微小な振動の検出に利用できる〔¹〕。またダイヤモンド中のNV中心などを用い、生体内のプロトンや水和環境の微小な磁気信号を検出する試みも進んでいる。水素結合の状態変化（例えばタンパク質の構造変化による水素結合ネットワークの変動）を量子センサーで読み取れば、生体内反応を非侵襲にモニタリングする手法にも繋がる可能性がある。

触媒制御: 酵素反応においてプロトン移動のトンネル効果が触媒効率に大きく寄与することが知られている。量子力学的なプロトン移動を人工触媒に取り入れることで、反応の選択性や速度を飛躍的に高めるアイデアが提案されている。近年の研究では、多くの酵素反応で水素（プロトンや水素原子）のトンネル効果が広範に起きている証拠が蓄積されており、特定の振動モード（プロモーター振動）が量子トンネルを増強するとも示唆されている。今後、酵素の活性部位を模倣した合成ホスト分子内に水クラスターを配置し、プロトン移動経路を量子的に制御する触媒が開発される可能性がある。実際、人工カプセル分子内で水分子を介したプロトン交換反応が酵素並みに加速される例も報告されており、水素結合ネットワークを設計することで量子効果による触媒制御が実現できると期待される〔³〕。

量子通信: 水素核スピンやプロトンの量子状態を情報担体として用いる量子通信の概念も考えられる。分子内や水素結合で結ばれたスピンペアのエンタングルメント生成はすでに報告されており、これを拡張して水素結合ネットワーク全体に量子的相関を広げることで情報を伝達する構想である。一例として、細胞内の微小管などが量子的な情報チャネルとなり得る可能性が議論されている（後述のOrch OR理論参照）。さらに、プロトンが並んだ水のワイヤ（例：水チャンネル中の水素結合列）は、プロトンの協奏的なトンネル移動によって情報を運ぶ「量子回路」として振る舞う可能性もある。これらは現時点では理論的な提案に留まるが、将来的にプロトン伝導体を使った量子中継素子や、水素結合による量子ネットワークが開発されれば、液体的環境で動作する新種の量子通信が実現するかもしれない。

神経模倣素子: 生体のニューロン動作を再現するデバイスとして、水溶液中のプロトン移動を利用したプロトン型メモリスタ*が開発されつつある。近年、プロトン透過性グラフェン膜を用いて水溶液中で動作する化学メモリスタ（ケミメモリスタ）が報告され、電圧パルスで膜を介したプロトン移動を制御することでシナプス様の可塑的応答を実現している〔²〕。このデバイスは

水中で動作し、自らプロトン濃度勾配を変化させて感度を調節する「自己センシング機能」を持つとされ、ニューロモルフィックな情報処理に利用可能であると期待される。さらに水分子クラスタ中のプロトンダイナミクスを利用した人工ニューロン素子も提案されており、水系デバイスで脳の情報処理をエミュレートする研究が進んでいる。

超伝導と水系の関係性

水素や水は超伝導とも深い関わりを持つ。固体物質中では、水素を多く含む化合物（超水素化物）が高温超伝導を示すことが近年相次いで報告されている。硫化水素を高圧下に置いた系では摂氏約-70℃（203 K）という従来に比べ桁違いの高温で超伝導転移が起き、これは水素原子の軽い振動が電子対形成（クーパー対結合）を強めた結果と解釈された。その後もランタン超水素化物（ LaH_{10} ）で室温近くの超伝導が達成されるなど、水素結合の量子振動が電子の結合媒介に寄与する例が続いている[4]。このように水素は固体中で**電子の超伝導**を助ける役割を果たす一方で、場合によっては**プロトン自体が凝縮**し協調的に振る舞う可能性も議論されている。理論的には、極低温下で結晶中のプロトンがボース凝縮し**プロトン超伝導**状態を作ることとも予測され、天体物質中（中性子星の核など）で実現しているとの説もある。

生命体内の水に目を向けると、明確な超伝導現象は確認されていないものの、いくつか示唆的な知見が存在する。細胞内の微小管は整列した双極子（タンパク質中の芳香族環や水分子）からなる格子構造であり、ここに外場や分子振動が与えられると巨視的なコヒーレンス（整列した振動状態）が生じるとフロリッヒは提唱した。これは、一種のボース凝縮的現象であり、電子ではなく双極子振動の「誘導秩序」という点で超伝導に類似している。実際に微小管内の高周波振動モードについて計算した研究では、弱いながらもコヒーレント振動（フロリッヒ凝縮）の可能性が示唆されているが、強い凝縮が起きるかについては賛否がある。また、生体内の**プロトン伝導**も超伝導と類比して論じられることがある。水の水素結合ネットワーク中ではプロトンが飛び移る「グロットフース機構」により通常のイオン拡散を超える速さで電荷が移動する。ナノチャネル内の水ではプロトンが秩序だったチェーンを形成しバリヤをトンネルで通過する現象も観測されており、損失の少ない**超流動的**なプロトン移動の可能性を示しているとの報告もある。もっとも、これらは電子電流が抵抗なく流れる超伝導とは異なる現象ではあるが、生体内の水が高い秩序性や協調性を帯びうる例といえる。今後、もし生体由来分子で室温動作する超伝導的な電流経路が発見されれば、生命のもつ量子現象として画期的であるが、現時点では仮説の域を出ていない。とはいえ水や水素結合の量子効果を巧みに利用することで、超伝導デバイスの材料設計（例えばプロトンを介した新たなクーパー対機構）に革新をもたらす可能性は十分に考えられる。水系材料と超伝導の関係は今後も生命現象との比較を含め興味深いテーマである。

光学系など他の量子技術とのハイブリッド提案

量子技術の発展において、水や生体分子系と光学系・他の量子プラットフォームを組み合わせたハイブリッド構成も重要になる。光子は長距離の量子情報伝達に適しており、生体由来の量子デバイスと接続することで相互補完的なシステムを構築できる。例えば、**光学的共振器と水素結合デバイスの融合**が考えられる。水素結合を含む分子を光学キャビティ内に配置し、光と分子振動が強結合すると、振動と光子が混ざり合ったポラリトン状態が形成される。これにより分子の量子状態を光で遠隔読み出し・操作することが可能であり、水素結合ネットワーク中の量子状態を光学的にコントロールする手段となる。事実、光合成アンテナ分子と光キャビティの強結合実験では、常温で振動コヒーレンスが延命され得ることが示唆されており、生体関連分子でも光学ハイブリッドにより量子効果を増強できる可能性がある。

脳や神経系に着目すると、**光と電磁振動のハイブリッド**が提案されている。近年の理論研究では、神経軸索を囲むミエリン鞘が円筒型の光学空洞の役割を果たし、分子振動から自発的に光子対（エンタングルした双光子）を生成できることが示された。これはミエリン中の脂質分子のC-H結合振動が光キャビティモードと相互作用することで、体温（約37℃）でもエンタングルした光子ペアが多数放出され得るという予測である〔5〕。このような**量子光源**が脳内に存在すれば、神経活動の同期や情報伝達に量子的相関が関与する可能性がある。現時点では理論提案段階だが、神経系と光学量子回路を接続してエンタングルメントを伝達・検出する技術が発展すれば、脳内量子効果の解明のみならず、新しい量子ネットワーク素子にも繋がるであろう。

また、**他の量子技術との融合**としては、水系デバイスと超伝導量子回路のハイブリッドが考えられる。例えばプロトン型メモristaを超伝導量子ビットのクラスタと結合し、超伝導回路で発生した量子状態をプロトン移動の変化として保存・増幅するような構成である。超伝導回路は高速かつコヒーレントに動作する一方、水系デバイスは自己組織化や化学的可塑性といった特長を持つ。両者を組み合わせることで、量子ビットの状態を化学的に増幅・記憶したり、逆に化学刺激で量子ビットの動作を制御したりといった相互作用が可能になる。これにより、量子コンピュータと生体分子的アナログメモリを接続した新たな情報処理パラダイム（量子ニューラルネット的なデバイス）が構想できる。近未来には、このような異分野融合型の量子機械が登場しうるであろう。

脳内の量子効果に関する理論と近年の実験

脳における量子効果については、長年にわたり大胆な仮説と議論が続けられてきた。その代表例がペンローズとハメロフによる**Orch OR 理論（オーケストレーションされた客観的崩壊理論）**である。このモデルでは、**ニューロン内部の微小管**が量子計算の場となり、微小管内の量子コヒーレンスが一定時間維持された後、重ね合わせ状態の自発的崩壊（客観的崩壊）が意識の瞬間を生むと提唱した〔9〕。微小管は多数のタブリンタンパクからなる中空管状の構造であり、その内部や表面にある疎水性ポケットで双極子（芳香族アミノ酸や結合水分子）がテラヘルツ領域で振動しうる。Orch OR 理論では、これら双極子のコヒーレントな振動（フロリッヒ凝縮）を量子ビットとみなし、10MHz 程度の速さでタブリンの配置が変化する「量子自動機械」として微小管をモデル化している〔9〕。この仮説は登場当初より「脳は温かく湿った環境のため量子効果は即座にデコヒーレンスしてしまう」という批判を受けたが、ハメロフらは麻酔薬の作用機序や意識消失との関連から間接的な支持を主張している（麻酔薬分子が微小管タンパク質に結合し量子的な処理を妨害するため意識が消失すると仮定）〔9〕。この理論自体は依然論争的であるものの、近年になり「**脳内で想定以上に長い量子コヒーレンスが維持されている**」ことを示す実験的知見が報告され始め、再評価の機運も高まっている。

2010 年代以降、微小管に関連した量子効果検証の研究が進み、いくつか注目すべき成果が得られている。**微小管内のコヒーレンス持続時間**については、プリンストン大学などの共同研究グループが微小管中の芳香族アミノ酸（トリプトファン）の自己蛍光寿命を計測し、エネルギー移動の距離を推定した。驚くべきことに、室温下でも微小管格子内で励起エネルギーが約 6.6nm 拡散することが示され、微小管が**効果的な光アンテナ**として働きうることが明らかとなった。さらにこの系では一般的なフォスター機構では説明できない長距離のエネルギー移動が観測され、麻酔薬（イソフルランなど）の存在下でその距離が有意に減少することが報告された。この結果は、微小管内で何らかの量子的な励起移動（エキシトン拡散）が起きており、それが麻酔薬により乱される可能性を示唆している〔6〕。またカナダ・アルバータ大学のジャック・タスインスキーらは、タブリン溶液に紫外光を当てた際の集団励起についてシミュレーションと実験を行い、**約 5**

ナノ秒もの長時間にわたりコヒーレントな蛍光応答が持続することを確認したと報告している。従来の予想では室温の微小管でコヒーレンスはピコ秒以下で失われると考えられていたため、これは「教科書的予想の数千倍」もの長寿命である。5 ナノ秒は神経伝達に必要な過程より十分高速であり、生体内で量子効果が機能してもおかしくない時間尺度である。さらに米国フロリダ中央大学のグループは、可視光を照射した微小管試料が最大1秒程度の長時間にわたり微弱な再放出（遅延発光）を示すことを観測したとされる。これは人間の認知反応時間（数百ミリ秒）に匹敵するスケールであり、もし再現性が確認されれば微小管に一時的な量子記憶ないし遅延応答が存在する可能性を示唆する。以上のような「温かく湿った脳でも量子コヒーレンスが思いのほか長持ちする」という実験的証拠の蓄積は、Orch ORをはじめとする量子脳理論に一定の現実味を与えるものと言える。

一方、脳内分子の量子トンネル効果に関しても興味深い研究がある。DNA 塩基対のタウトマー（互変異性体）化は、プロトンの位置交換を伴う現象であり、量子的トンネル効果で塩基対内のプロトンが飛び移ることで起こりうる。長らくこのタウトマー化はごく低頻度で起こるがゆえにDNA複製時のミスマッチ（突然変異）の原因になると考えられてきた。最近の理論研究と分子シミュレーションでは、グアニン-シトシン塩基対の2重プロトン移動は古典的な活性化飛び越えよりも量子トンネル寄与の方が数桁も速いことが示された。さらに周囲を水分子で囲まれた実環境をモデル化した結果、生体温度（310K）でも標準型⇄タウトマー型の平衡がナノ秒以下の極めて高速な時間で成立し、タウトマー存在比がおおよそ 10^{-4} 程度に達する可能性が報告された。これは従来予想より高い割合で、一部のプロトンが常に量子的に位置を入れ替えていることを意味し、DNAの突然変異モデルに修正を迫る知見である^[8]。また別の研究では、DNAのらせんをほどくヘリカーゼ酵素の作用中にタウトマーが「トラップ」され安定化することでミスマッチが生き残る可能性が示唆されている。このように神経細胞を含む生体環境でのタウトマー化が実際に観測されつつあることは、生体分子内でプロトンの量子的挙動が無視できないことを示す。一方でこれら単分子レベルの量子効果が脳のマクロな機能（記憶や意識）に結びつくかについては依然不明であり、多くの神経科学者は古典的なネットワークモデルで十分説明できると考えている。実験事実もまだ間接的であり、「量子脳」を決定づける明確な予測と検証が求められているのが現状である。しかし、仮説段階だった量子効果（コヒーレンスやトンネル）が脳内で現実には起こりうるとの示唆は、意識研究や脳科学に新たな展開を促している。テラヘルツ波や超高速分光による非侵襲計測技術の進歩により、今後さらに直接的な実験検証が行われるであろう。仮に脳内で量子的情報処理が確認されれば、「熱雑音に覆われた脳でも量子現象が機能する」という新たな知見となり、人類の心の理解に革命をもたらす可能性がある。これは量子技術の応用という観点からも、脳を模倣した量子機械の設計などにフィードバックされるに違いない。近未来における量子機械と量子脳の融合は、依然多くの未知を含むものの、その可能性は理論と実験の双方から着実に拓かれつつあると言えよう。

[1]: Khariushin, I. V. *et al.* “Supramolecular dyads as photogenerated qubit candidates.” *Nature Chemistry* *17**, 652-658 (2025). DOI: 10.1038/s41557-024-01716-5

[2]: Wang, Y. *et al.* “Aqueous chemimemristor based on proton-permeable graphene membranes.” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* *121**, e2314347121 (2024). DOI: 10.1073/pnas.2314347121

[3]: Hart - Cooper, W. M. *et al.* “Protein-like proton exchange in a synthetic host cavity.” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* *112**, 15303-15307 (2015). DOI: 10.1073/pnas.1515639112

- [4]: Drozdov, A. P. *et al.* “Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system.” *Nature 525*, 73-76 (2015). DOI: 10.1038/nature14964
- [5]: Liu, Z. *et al.* “Entangled biphoton generation in the myelin sheath.” *Phys. Rev. E 110*, 024402 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevE.110.024402
- [6]: Kalra, A. P. *et al.* “Electronic Energy Migration in Microtubules.” *ACS Central Science 9*, 352-361 (2023). DOI: 10.1021/acscentsci.2c01114
- [7]: Babcock, N. S. *et al.* “Ultraviolet Superradiance from Mega-Networks of Tryptophan in Biological Architectures.” *J. Phys. Chem. B 128*, 4035-4046 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c07936
- [8]: Slocombe, L. *et al.* “An open quantum systems approach to proton tunnelling in DNA.” *Communications Physics 5*, 109 (2022). DOI: 10.1038/s42005-022-00881-8
- [9]: Hameroff, S. & Penrose, R. “Consciousness in the universe: A review of the ‘Orch OR’ theory.” *Physics of Life Reviews 11*, 39-78 (2014). DOI: 10.1016/j.plrev.2013.08.002

5.6 プロトン量子技術の課題と展望

プロトンの量子現象を応用するためには、依然として多くの課題が存在する。第一に、プロトンは外部環境（周囲の原子やフォノン場）との相互作用が強く、**コヒーレンス時間**（量子状態が保持される時間）が電子系に比べ短くなりがちである。そのため、量子ビット担体として利用する場合には巧妙なデコヒーレンス抑制法やエラー補正手法が必要となる。幸い核スピンは電荷を持たないため比較的ノイズに強いが、それでも高精度な制御には限界がある。第二に、実験的制御のスケールアップも課題である。STMによる単一クラスター操作やMRIによる多数スピン操作はいずれも一長一短があり、実用的な量子デバイスとするには動作温度や動作速度の面で改良の余地が大きい。例えばSTMベースの操作は極低温・真空条件下でしか安定しないが、量子効果を実用化するには室温・常圧環境での安定動作を目指す必要がある。第三に、理論的な設計指針の確立も重要だ。プロトンの量子ダイナミクスは電子とは異なるスケールでエネルギー景観を形作るため、その挙動を高速にシミュレーションし最適化するための計算モデルが求められる。経路積分分子動力学や機械学習ポテンシャルといった先端手法は登場しているものの、これらをデバイス設計に適用するには物理・化学・情報工学の連携が不可欠である。

それでも、プロトンの量子的性質を意図的に活用する方向性は、我々に新たな工学的地平をもたらす可能性が高い。水という遍在する物質と生命現象から学んだ量子効果をデバイスに取り込むことで、私たちは自然が営むプロセスを模倣・増幅した革新的技術を創出できるかもしれない。プロトントンネリング研究の延長線上には、人類の理解と技術の双方に対する大きなブレイクスルーが潜んでいると言えよう。社会的インパクトの大きさを考えれば、今後も産学連携や国際協力のもとでこの分野の研究開発が推進されることが望まれる。

- [7]: Cho, Z. H. *et al.* (2025). 「Pursuit and Review of Magnetic Resonance Imaging (MRI) based Quantum Computing – Qubit Generation, Spin Purification, Tailored RF Pulses and MRI Sequences for Quantum Computing」 *arXiv preprint*: arXiv:2505.12778. DOI: 10.48550/arXiv.2505.12778

[⁸]: Meng, X. *et al.* (2015). 「Direct visualization of concerted proton tunnelling in a water nanocluster」 *Nature Phys.* **11**: 235-239. DOI: 10.1038/nphys3225

[⁹]: Kim, Y. *et al.* (2025). 「Controlled Cooperativity of Proton Tunneling in a Water Trimer」 *Nano Lett.* (オンライン速報版) DOI: 10.1021/acs.nanolett.4c05831

[¹⁰]: Heo, J. (2025). 「Study reveals controlled proton tunneling in water trimers」 プレスリリース (UNIST) Phys.org, 2025 年 3 月 24 日. (提供元: Ulsan National Institute of Science and Technology)

6. 社会的インパクト

水の量子的性質とプロトントンネリングの研究は、基礎科学としての意義に留まらず、長期的に見れば社会に対して様々なインパクトを与えうる。まず、生命科学・医学への影響が挙げられる。例えば、細胞内水の振る舞いが蛋白質の機能や病態に及ぼす影響についての理解は、アルツハイマー病やパーキンソン病における異常タンパク質凝集の原因解明にもつながり得る。実験的に、細胞質中でタンパク質が高濃度になると周囲の水分子の運動が極端に遅くなり、その効果が数ナノメートル離れた所にまで及ぶことが報告されている。このような発見は、水が単なる溶媒ではなく細胞内プロセスを積極的に制御する役割を持つことを示唆し、創薬や疾患予防の新たな観点を提供する可能性がある。実際、「水は無関与の傍観者ではなく、細胞機械の働きを媒介する能動的な役割を担っている」という認識が広まりつつあり、生物学教育や研究のパラダイムにも影響を与えている。

また、DNA 中のプロトントンネリングが突然変異発生率に与える影響の研究は、遺伝学や進化生物学の基礎を見直す契機となるかもしれない。仮に量子的な塩基対ミスが生物内で一定頻度発生しうるとすれば、これは突然変異や DNA 損傷修復の理論に組み込む必要がある。将来的には、この知見を応用して遺伝的エラーの検出や抑制につなげるバイオテクノロジーの開発も考えられる。

エネルギー・環境分野においても、水とプロトンの量子論は重要な波及効果を持つ。水の構造とダイナミクスの理解は、気候モデルにおける水循環の精密化や、環境中での水汚染物質の挙動予測にも基礎的データを提供する。また、水素結合ネットワークの量子的挙動を解析・制御する技術（例えば前述の CVS 分光法）は、広く溶液中の分子相互作用を調べる手段として応用可能である。電解質溶液や糖・アミノ酸を含む溶液、DNA やタンパク質を含む溶液など、あらゆる化学・生物系に CVS を適用することで、分子間の水素結合や電荷移動の詳細を解明できる道が開けている。これは医薬品の溶解性・安定性の研究や、食品・材料科学における水和状態の評価など実用的な課題にも貢献し得る。

さらに、量子コンピューティングや情報技術への波及も見逃せない。プロトンや水を利用した量子技術の研究は、人々に量子科学への関心を喚起し、次世代の科学者育成や科学リテラシー向上にもつながる。量子力学的な現象が身近な「水」という存在の中に潜んでいることは、科学教育上も興味深い題材であり、自然現象の奥深さを再認識させる。加えて、水の研究は異分野融合の典型であり、物理・化学・生物の専門家が協働することで革新的な知見が得られるという成功例は、学際研究の重要性を社会に示す好例ともなっている。

総じて、水の量子的性質とプロトントンネリングに関する研究は、科学的ブレイクスルーが種々の技術革新を誘発し得る典型と言える。その恩恵は医療・環境・産業と幅広い領域に及び、持続可能な社会や新産業創出に資する可能性を秘めている。

7. 終論

水という身近でありながら奥深い物質は、その特異な性質の根底に量子力学的な原理が横たわっていることを、本稿で見てきた。水分子同士の強固な水素結合ネットワークが水のマクロな異常物性を生み出している一方で、ミクロな視点ではプロトンのゼロ点振動やトンネル効果、電子の非局在化といった量子的現象が絶えず起こっている。特にプロトントンネリングは、水クラスター内や氷の結晶、水溶液中のプロトン移動経路、さらには酵素や DNA 内に至るまで、多岐の場面で重要な役割を果たし得ることが明らかになりつつある。これらの知見は、水の振る舞いを根本原理から理解する上で極めて示唆的であるだけでなく、量子生物学や分子技術への応用可能性を拓くものである。

水の量子的性質の解明は、各分野の既存の理論体系にも新たな視点をもたらす。例えば、生物学では「量子の揺らぎの上に成り立つ生命像」、化学では「量子トンネルを考慮した反応機構」、物理学では「室温で現れる多体量子効果の実証」といった具合に、それぞれの文脈で水の研究成果が波及効果を発揮している。水という単純な分子が示す複雑な相互作用は、依然として科学のフロンティアであり、そこには未知の物理現象や新概念が潜んでいる可能性が高い。結論として、水の量子的性質とプロトントンネリングの研究は、生命現象と量子現象の架け橋として学術的にも社会的にも大きな価値を持ち、今後も精力的な探究が求められる分野である。

8. 今後の課題

本稿で論じたように、水の量子的性質に関する理解は着実に進展しているものの、依然として多くの課題が残されている。第一に、**直接的な観測技術の高度化**が挙げられる。水溶液中や室温環境下でのプロトンの量子挙動（例えばトンネリングや量子もつれ）を検出・可視化することは極めて困難であり、現在のところ多くの知見は低温・真空下で得られている。今後は、時間分解分光や先端的な顕微鏡技術のさらなる向上によって、生理的条件下での量子現象の**実時間観測**に挑む必要がある。特に、生体分子内でプロトンが量子的に移動する様子を捉えられれば、量子生物学の実証として画期的である。

第二に、**理論面での課題**として、水の大規模な量子シミュレーションの高度化がある。水 1 分子当たり 3 つの N 原子 (N=原子数) のフル量子シミュレーションは計算資源的に困難であり、現在は経路積分法などで核量子効果を取り入れているが、水 1 万個規模での長時間挙動を量子的に再現するのはまだ遠い目標である。また、核量子効果と電子構造変化の相互作用を精密に記述する理論枠組みも必要とされる。氷や液体中でのプロトン協奏トンネリングを統一的に扱う理論、開放量子系としての水-溶質系の記述、さらには量子もつれやエンタングルメントエントロピーを定量評価する試みも始まっているが、これらを実験と照合しつつ発展させることが重要である。

第三に、**生物学的意義の検証**が課題である。DNA 塩基対でのプロトントンネリングが突然変異率に及ぼす影響や、酵素反応でのトンネリングが生体内条件でどの程度効いているかなど、理論・モデル研究で示唆された量子現象を実際の生物系で検証する研究が求められる。例えば、特定の酵素において同位体効果 (H から D への置換による速度変化) が量子論と矛盾しないか精密に調べる、人工的に塩基対の寿命を測定して量子効果を評価する、といった実験が考えられる。こうした検証により、生物が量子効果を有意に利用しているのか、それとも副産物的に生じているだけなのかが明らかになるだろう。

最後に、**応用への架橋**も課題である。プロトン量子デバイスの概念実証は始まったばかりであり、安定した量子制御を実現するには雑音対策やビット寿命 (コヒーレンス時間) の延長など多くの技術的ハードルが存在する。プロトン NMR 量子計算の提案も、実際に動作する量子ゲートを構築

し大規模計算に耐えるには、ハードウェア・アルゴリズム両面でさらなる研究が必要である。一方で、触媒開発や材料科学に量子効果の知見を応用する場合も、原子レベルでの設計指針を得るには現象解明と並行した試行錯誤が避けられない。例えば、プロトン伝導材料における量子効果を高めるためにナノ構造を最適化する、といった研究は始まっているが、その効果をマクロな特性向上につなげるにはスケールアップの問題がある。

以上のような課題に取り組むことで、水という基本的な物質の理解が一層深まり、量子力学とマクロな現象の橋渡しが進むであろう。それは同時に、新しい科学技術や概念の創出につながり、人類の知的フロンティアを広げる原動力となるに違いない。水の量子的性質とプロトントンネリングの探究は、依然として始まったばかりであり、その先には多くの驚きと発見が待ち受けている。

参考文献

1. L. G. M. Pettersson, A. Nilsson (2015) **The structural origin of anomalous properties of liquid water**, *Nature Commun.* **6**: 8998. DOI: 10.1038/ncomms9998
2. Mischa Flör *et al.* (2024) **Dissecting the hydrogen bond network of water: Charge transfer and nuclear quantum effects**, *Science* **366**(6468): eads4369. DOI: 10.1126/science.ads4369
3. X. Meng *et al.* (2015) **Direct visualization of concerted proton tunnelling in a water nanocluster**, *Nature Phys.* **11**(3): 235-239. DOI: 10.1038/nphys3225
4. Y. Kim *et al.* (2025) **Controlled Cooperativity of Proton Tunneling in a Water Trimer**, *Nano Letters* (in press). DOI: 10.1021/acs.nanolett.4c05831
5. R. A. W. Frank *et al.* (2004) **A molecular switch and proton wire synchronize the active sites in thiamine enzymes**, *Science* **306**(5697): 872-876. DOI: 10.1126/science.1101030
6. L. Masgrau *et al.* (2006) **Atomic description of an enzyme reaction dominated by proton tunneling**, *Science* **312**(5771): 237-241. DOI: 10.1126/science.1126002
7. L. Slocombe *et al.* (2022) **An open quantum systems approach to proton tunnelling in DNA**, *Commun. Phys.* **5**: 109. DOI: 10.1038/s42005-022-00881-8
8. Kevin Kubarych *et al.* (2013) **Crowding Induced Collective Hydration of Biological Macromolecules over Extended Distances**, *J. Am. Chem. Soc.* (Press release: University of Michigan News, Dec 17, 2013)
9. JooHyeon Heo *et al.* (2025) **Study reveals controlled proton tunneling in water trimers**, *Phys.org* (Press release: Ulsan National Institute of Science and Technology, Mar 24, 2025)
10. Celia Luterbacher (2024) **A new spectroscopy reveals water's quantum secrets**, Press release: École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Oct 25, 2024. DOI: 10.1126/science.ads4369 (corresponding Science article)