

複雑破壊現象を支配する量子超越性の材料力学

研究代表者	京都大学・工学研究科・教授	
	平方 寛之（ひらかた ひろゆき）	研究者番号：40362454
研究課題情報	課題番号：24H00032	研究期間：2024年度～2028年度
	キーワード：機械工学、材料力学、複雑破壊、量子力学	

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

材料の持つ豊かで多様な物性を活かした革新的なデバイスを創り出すには、材料の強度に関する本質的理解とそれに基づく強度創生・設計が不可欠である。破壊の力学法則について詳細な研究が積み重ねられ、その学術成果は成熟の域に達しつつある。しかし、材料強度の普遍的な根源に介入して、それを自在に操ることに関して、我々人類は依然として十分な術を有していない。私たちの研究グループは、電子線等を用いて材料に余剰電子や正孔（ホール）を強制的に注入することで、材料が本来持ちえない変形・強度特性を発現することを発見した（図1）。この効果はき裂や転位、原子空孔といった構造欠陥に敏感な複雑破壊現象（き裂による破壊、塑性変形、クリープ・疲労など）において劇的に拡大して現れ、従来の材料強度の限界を超越した強度特性を発現する（図2）。このような複雑破壊現象に対する劇的な量子的強度変化は、古典的な解釈による効果を超越したもの（材料強度の量子超越性）であり、材料強度学にパラダイム変革を迫るものと考えている。

そこで本研究では、構造欠陥（力学場）と電子/ホール分布を制御した試験片に対する複雑破壊強度実験と量子力学に基づく強度解析を行い、構造が生み出す力学場と量子的強化効果の重畳作用を解明する。これにより、実際の機械構造物において問題となる複雑破壊現象を劇的に変化させる量子超越性の根源的なメカニズムを明らかにして、それらを支配する普遍的な学理を構築する。

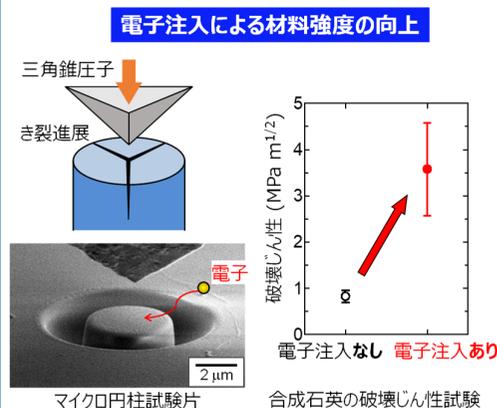


図1 電子/ホールが材料強度に及ぼす影響

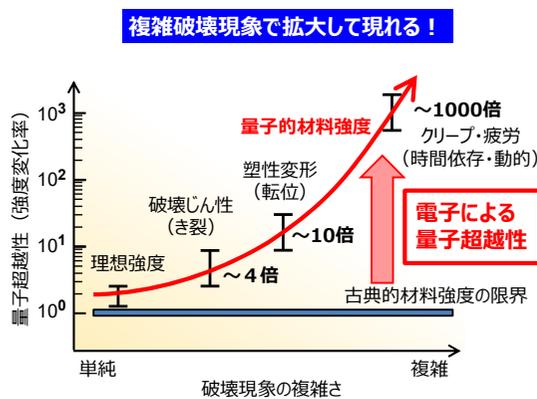


図2 複雑破壊現象における材料強度の量子超越性

●研究の方法

一見多様に見えるこれらの複雑破壊現象は、いずれも微視的な構造欠陥、例えばき裂や転位に敏感な現象であり、劇的な強度変化には構造欠陥が重要な役割を果たす。すなわち、材料強度の量子超越性は、構造欠陥が生み出す力学場と電子による量子的効果の重畳作用として表れる。このため、構造欠陥と電子/ホール分布を制御した複雑破壊強度実験を行うとともに、電子注入による微視的欠陥構造の変化を、電子顕微鏡により原子レベルから観察・分析する。実験・観察と並行して、電子注入材に対する量子力学強度解析を行う。さらに、個々の電子が受け持つ応力を分解・抽出する独自理論（電子応力理論）に基づいて、強度が変化する根源的な力学原理を追究する。

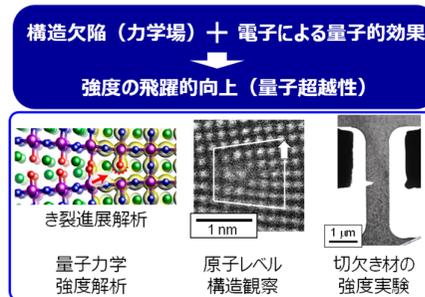


図3 研究方法及研究体制



この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●本研究の特徴、期待される学術的成果と意義

- 究極的に小さな粒子である電子/ホールにより多様な変形・破壊現象を変化させる現象に着目して、その機構と法則を解明する。
- 実構造物で問題になる複雑破壊現象（き裂の破壊、塑性変形、クリープ・疲労）を対象とする。
- 量子超越性（電子/ホールによる強度の劇的な変化）を利用した超強度特性を実現する。
- 複雑破壊現象における量子的効果を解明するための基盤評価技術、すなわち、余剰電子/ホールの制御・評価、電子状態制御下での複雑強度実験、欠陥構造観察、電子解析技術、および電子応力理論の概念を確立する。
- 素材や組織により強度を設計する古典材料強度学から、電子によって材料強度を劇的に変化させる「量子超越性の材料力学」へとパラダイム変革をもたらす。
- 動的な粒子である余剰電子/ホールは、材料中に注入・保持・除去することが可能であり、これを制御することで自在に材料強度を書き換えられるリライタブル性を有する。すなわち、材料を「作る」から機能を「描く」へ材料強度設計に概念的革新をもたらす。

●科学技術・産業界・社会への波及効果

静的な単純破壊強度に比べて、疲労やクリープといった複雑な破壊現象は予測や予防が困難であり、材料強度の理解が進んだ現代においても産業界における致命的問題・機械工学における中心的課題となっている。本研究は、こうした複雑破壊強度を指数関数的な飛躍的向上によって、多様化の進む未来社会の安全な社会基盤を創るものである。

量子コンピューターに代表されるように、現在、世界は量子技術によるパラダイムシフトの只中であり、量子技術の覇権をめぐる国際競争は激化の一途にある。余剰電子の特異な量子状態を利用して「量子超越的強度特性」を創出する本研究は、まさに量子技術によって機械工学分野にパラダイムシフトを起こすものであり、各国に先駆けて新しい学術領域「量子超越性の材料力学」を開拓することで世界に大きな波及効果をもたらす。