

氏 名	た なか よし み 田 中 良 巳
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学位記番号	人 博 第 67 号
学位授与の日付	平成 11 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	人間・環境学研究科文化・地域・環境学専攻
学位論文題目	ゲルの破壊

(主査)

論文調査委員 教授 後藤喬雄 教授 前川 覚 助教授 宮本嘉久 教授 田中文彦

### 論 文 内 容 の 要 旨

破壊の研究において亀裂先端近傍の物性と破壊との関係づけは破壊力学として、また破断面の幾何学的な特徴の解析はフラクトグラフィとして研究されてきた。破壊力学では、3次元物体の破壊を2次元の問題(破壊進行線を点に、破断面を線に見なす)に還元してモードI, II, IIIという変形の3つの基本モードに分解し、一般の破壊はこれらの基本モードの重ねあわせとして理解する、という方法をとってきた。破断面に残された模様は破壊進行線が描いた軌跡であるが、硬い物質について報告されている例では破断速度に依存して破断面に鋭い凹凸が観測されており、これは破壊を3次元の現象として捉える必要があることを意味している。

本学位申請論文は、最も柔らかい固体であるゲルを研究対象として取り上げ、3次元破壊の基礎となる要素の幾何学的特徴づけと、高分子ゲル破壊の物性・力学的な側面について論じた実験的研究の報告である。申請者は、その前半において、高分子ゲルの透明性と破壊速度が十分制御できるという特長を利用し、種々の方法でのパターンおよび亀裂先端の形態観察により、破壊の3次元性を特徴づける要素を同定し、幾何学的特徴を明らかにするとともにその遍在性の存在を明らかにしている。後半では、定常破壊が実現できる実験法を開発し、破壊研究において基本的な量である破壊エネルギーの架橋点密度、破断速度依存性の測定より、高分子ゲルにおける破壊機構についての基礎的なデータを提出している。

本論文の第1章では、本研究の背景について、これまでの破壊研究一般と高分子物質における破壊研究の特徴が論じられ、研究の動機とその概要について述べられている。

第2章では、試料として用いたアクリルアミドゲルの合成法、自作したゲル破断装置および測定系、破断の方法、観察法について説明している。

第3章は、破壊の3次元性の特徴づけに主たる論点を置いて、ゲルの破断面に現れる模様の破断速度依存性、遅い破断速度における亀裂先端の直接観察の結果について述べたものである。遅い破壊では破断方向に対して約45度の角度をなす交叉状の模様が、速い破壊では破断方向にほぼ平行に並んだ直線状の模様が観測される。模様の特徴的な大きさは、破断速度、溶媒の添加によって変化するが、2つのパターンの転移は破断速度のみに依存することを明らかにした。パターンを描く線は破断面の段差によるものであり、パターンの転移は段差を生じさせる破壊進行線上の欠陥の伝播方向、内部構造の動的転移と捉えられること、高分子鎖の協同拡散に関する拡散長とゲルの網目サイズとの競合で生じることを示唆した。

交叉模様を描く遅い破断速度において亀裂先端の前後、上下方向からの観察により、破壊進行線上の欠陥の立体構造を同定した。この欠陥部分では破壊進行線は不連続な2つの部分からなり、一方の破壊進行線は他方の破壊進行線が作った破断面上に端点を持っている構造であることを明らかにした。さらにこの構造は破壊進行線の不連続性と破壊の必要条件である破断面の連続性を両立させる一般的な構造であることを示した。破壊進行線と破断面との交叉の仕方により、4種のバリエーションが存在し、それぞれ2種づつは亀裂先端を異なる方向にほぼ一定速度で移動する。これが観察された破断面上の模様で

ある。異なる方向に進む欠陥が衝突した時、その組み合わせによって欠陥の立体的絡み合いが生じる場合があることを指摘し、実時間観測によって確認すると共に、他の組み合わせについても衝突時の形態の分類を行った。また、エラストマーについて報告されている亀裂先端の特異な構造と本研究で同定された破壊進行線の不連続部分の構造との同相性を指摘した。

第4章では高分子ゲル破壊の物性面に注目し、定常破壊が可能な装置を製作し破壊エネルギーの測定を行っている。物体が破壊するときには破壊に至るまでに蓄えられる弾性エネルギー、結合を切断して新しい破断面を作るためのエネルギー、破壊の過程で散逸されるエネルギーが関係する。定常破壊では弾性エネルギーを除いた後2者が測定される。架橋点密度を変化させた一連のゲルに対し、破断速度の関数として破壊エネルギーを測定し、破壊エネルギーの絶対値、および破断速度に対する増加の割合共に、架橋密度が大きいほど小さくなる、また低破断速度では破断面が荒れることにより破壊エネルギーの見かけ上の増加が見られる、という結果が示された。これらの結果から、ゲルの破壊においては結合を切断するエネルギーより散逸するエネルギーの方が支配的であること、ゲルの破壊の進行は散逸するエネルギーをできるだけ小さくするような経路で生じるのではないことが明らかにされた。

第5章ではこの論文の結論とこれからの展望について述べられている。

### 論文審査の結果の要旨

最近、破壊力学一般や亀裂の形態、特にその伝播に注目が集まっている。摩擦の微視的理論に現れる破壊から、日常生活で経験する破壊、巨大な材料や地層の破壊においても、その破断面全体が滑らかな面で構成されていることはむしろ稀で、大小の凹凸があったり、滑らかでも多様な線と面が交錯しているのが観察される場合が多い。申請者の意図は、このような破壊の3次元性を反映した、破断面に見られる模様は破壊進行線が変形の3つの基本モードI~IIIの重ね合わせで記述できるような滑らかな連続した線だけで構成されるのではなく、破断面の複雑性を内包する別の要素を含んでいることを示しており、この要素の解明が破壊力学とフラクトグラフィを融合させる新しい研究分野の展開につながる、という点にある。本研究の契機は、申請者が3次元破壊研究に適した系を模索する過程で、高分子ゲルの破壊において巨視的な規則的パターンが破断面に現れることを見出したことにある。本学位申請論文は、高分子ゲルの破壊において亀裂先端の直接観察により見出された破壊進行線の不連続部分の3次元性に重点をおいた幾何学的な特徴づけ、および亀裂伝播に伴う破壊進行線上での不連続部分の相互作用の解明、さらに定常破壊における破壊エネルギー測定より高分子ゲルの破壊における亀裂先端でのミクロな過程の解明を目的として行われた実験とその解析結果をまとめたものである。

申請者は、まず、高分子ゲルをレイリー波の速度より十分小さい破断速度で破断したとき、巨視的な規則パターンが破断面に現れること、破断速度に応じてそのパターンが動的な転移を示すことを見出した。破断面の模様に着目しているのは、破断面に現れる段差は破壊進行線が直線でないこと、すなわち破壊進行線に沿って変位が一樣ではなく、破壊を3次元の現象として見る必要性を示唆しているとの考察に基づくものである。

遅い破断速度で形成されるパターンに焦点を絞り、亀裂先端の直接観察により亀裂先端に破壊進行線の不連続部分を見出し、その3次元構造を明らかにした。報告されている破断面のいくつかの観察結果やエラストマーで見られた亀裂先端の特異構造が、この構造により説明され、また位相幾何学的に同相であることを指摘した。破壊進行に伴う破壊進行線上での不連続部分同士の衝突を実時間観察し、大別して2種類の衝突が存在すること、それらの不連続部分の構造との関係を説明した。この破壊進行線の不連続部分の位相幾何学的構造の同定とその遍在性の指摘は、今後の3次元破壊研究で考慮すべき要素を発見、提出したのとして評価できる。破断面の観察は破壊完了後のいわば死んだ構造を見ているのに対し、亀裂先端部の直接観察、実時間観察は破壊機構の解明に直接結びつくものであり、これらの方法を精力的に用いた申請者の議論、説得性はこれまでの研究には見られないものである。またこれらの観察方法はゲルの破壊制御容易性と透明性を利用した手法であり、これに基づく成果を得たことは、3次元破壊研究において選択した系の適切さを示している。

次に、申請者は定常破壊が実現できる実験法を開発し、破壊エネルギーの測定を行い、架橋密度が小さくゲルの網目構造が疎であり弾性率が小さいほど、破壊エネルギーおよびその破断速度依存性が大きくなることを明らかにした。ゲルの破壊エネルギーの定量的測定は初めて報告されたものである。実験結果からゲルの破壊では散逸するエネルギーが支配的であること、また散逸するエネルギーが小さくなるように破壊の進行が起こるのではないことを示した。これらはゲルのミクロな

構造と破壊機構との関係についての分子論的解明に関して基礎的データと提供したものである。

以上のように、申請者は破壊の3次元性を調べるのに適した系として高分子ゲルに着目し、まず破壊の3次元性を理解するための基礎として破壊進行線の不連続部分の幾何学的特徴づけを行い、その後高分子ゲル破壊の物性的研究に進むという方法論を用いた。巧みな実験手法により、観察事実より亀裂先端の一般的なトポジカルな特徴を抽出し、また高分子ゲルの破壊機構について重要な知見を得ており、今後の破壊現象の実験的・理論的研究におおきな影響を与えることが期待できる。特に破壊進行線の不連続部分についての議論により、一般の破壊における複雑性を読み解く要素を明らかにしており、環境物性解析研究における成果として高く評価できる。

よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また平成11年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。