HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Crack Propagation Behaviors of Double Network Hydrogels under High Stretch [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	張, 曄
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(ソフトマター科学)
Dissertation Number	甲第14847号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/86023
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ye_Zhang_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（ソフトマター科学）　　氏　名　　張　曄

審査担当者	主査	教　授	龔　剣萍
	副査	教　授	黒川　孝幸
	副査	客員教授	角田　克彦（先端生命科学研究院）
	副査	准教授	佐藤　勝彦
	副査	准教授	中島　祐

学 位 論 文 題 名

Study on Crack Propagation Behaviors of Double Network Hydrogels under High Stretch
（高延伸下におけるダブルネットワークゲルの亀裂進展挙動に関する研究）

博士学位論文審査等の結果について（報告）

本論文は主に、高強度・高靭性を示すダブルネットワーク（DN）ゲルの亀裂進展挙動の解析や破壊メカニズムの解明に焦点を当てたものである。

DN ゲルは、硬くて脆い高分子鎖（第一網目）と柔らかくて延性に富む高分子鎖（第二網目）の二種類の網目から構成されており、延伸に際して、材料内部では第一網目の優先的な破壊と第二網目の伸長が多段階的に生じる。この内部破壊プロセスは、一軸延伸過程ではネッキング挙動として、また亀裂近傍では局所的なネッキング領域（ダメージゾーン）として観測され、DN ゲルの優れた強度・靭性に寄与していると考えられている。一方で、構造材料としての実用シーンで想定される、高延伸下における破壊挙動は未だ明らかとなっておらず、DN 材料の応用を目指す上でも今後の発展が要されていた。本論文は、このような背景を踏まえ、DN ゲルの高延伸下における破壊挙動およびそのメカニズムについて、亀裂の進展挙動の観点から解明を試みたものである。

申請者は、第一網目の組成を固定し、異なる第二網目の組成を用いることで、様々な力学挙動を示す DN ゲルを作製した。また、単一の高分子鎖網目から成るシングルネットワーク（SN）ゲルを作製した。これらについて、サンプルを高度に延伸させた後、後発的に亀裂を導入し、その進展挙動を偏光ハイスピードカメラで撮影することで、幅広いエネルギー解放率下における亀裂進展挙動の解析を行った。その結果、申請者は以下に示す DN ゲル特有の亀裂進展挙動および亀裂進展メカニズムを明らかにした。(1) SN ゲル、脆い DN ゲル、および一軸延伸にてネッキング挙動を示さない DN ゲルは、ゴム材料と同様に、あるエネルギー解放率を境に亀裂進展速度が低速モードから高速モードに遷移する速度ジャンプ現象を示す。(2) 一軸延伸にてネッキング挙動を示す DN ゲルは、低速モードが抑制され、亀裂は高速モードでしか進展し得ず、亀裂進展に必要な臨界エネルギー解放率 G_{th} は非常に高い値を示す。(3) 速度ジャンプ現象を示すゲルは亀裂近傍に高位相差領域が観測されないのに対し、低速モードが抑制された DN ゲルの亀裂近傍には大きな高位相差領域（ダメージゾーン）の形成が観測され、DN ゲルの破壊エネルギーを記述する従来のモデルが予測する通り、高い G_{th} に大きく寄与する。(4) 一方で、低速モードが抑制された DN ゲルについて、G_{th} 以上でひとたび亀裂進展が開始すると、高位相差領域の縮小に見られる通り、ダメージゾーンはその拡張に要するダイナミクスの遅さ故に十分に形成されず、散逸しきれない余剰エネルギーによって亀裂が高速モードへと加速される。上記の成果は、ハイドロゲル材料の高延伸下における亀裂進展挙動を体系的に調査した

初の報告例であり、また、低速モードの抑制という DN ゲルのユニークで優れた物性を新たに見出すことに成功している。

さらに申請者は、DN ゲルの進展亀裂の形状に着目することで、DN ゲルの破壊機構のさらなる解明を試みた。種々の組成から成る DN ゲルについて、亀裂の形状を定量的に解析した結果、先行研究の結果の通り、すべての亀裂形状は放物線から鈍角化されることを明らかにした。また、両網目の力学物性のコントラストに起因する、サイクル試験の除荷曲線に見られる急激な伸長硬化が、DN ゲルの亀裂の鈍角化に寄与していることが示唆された。さらに、亀裂先端開口変位から算出される特徴的なスケール長の解析により、DN ゲルの亀裂近傍には、非線形性弾性が支配的な破壊領域や、剛性率に起因するエネルギー流束が生じていることが示唆された。上記の成果は、DN ゲルの亀裂近傍の複雑な破壊機構の解明のための、新たな見地を提示するものであると言える。

これを要するに、申請者は、DN ゲルの高延伸下における亀裂進展挙動やそのメカニズムについて新知見を得たものであり、DN ゲルの耐亀裂性材料としての応用およびその破壊機構の本質的な解明に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（ソフトマター科学）の学位を授与される資格あるものと認める。