



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Non-Linear Analysis of Frictional Interface of Hydrogels [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	平山, 悟史
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(生命科学)
Dissertation Number	甲第14217号
Issue Date	2020-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79555
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Satoshi_Hirayama_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(生命科学) 氏名 平山 悟史

審査担当者	主査	教授 黒川 孝幸
	副査	教授 龔 劍萍
	副査	准教授 中島 祐
	副査	准教授 佐藤 勝彦

学位論文題名

Non-Linear Analysis of Frictional Interface of Hydrogels
(ハイドロゲルの摩擦界面における非線形解析)

博士学位論文審査等の結果について(報告)

生体内には臓や血管内の血流や関節などにおいて様々な低摩擦機構が働いており、その機構を解明することは省エネルギー化社会に寄与すると考えられている。生体組織の柔らかく濡れているという特徴に類似しているという点から、近年ではハイドロゲルの表面摩擦の研究が盛んに行われている。しかし、その多くは静止した状態での静止摩擦力、もしくは界面が動いている状態の動摩擦力の測定であり、静止摩擦から動摩擦へ転移する時の摩擦界面の挙動についての研究は未開拓の分野である。本論文は、このような現況にあるハイドロゲルの表面摩擦について、新たなパラメータを導入して、水中および濃厚高分子溶液中におけるゲル/ガラス界面の摩擦挙動について明らかにすることを主たる目的とした。

具体的に申請者はまず、水中でのポリビニルアルコール(PVA)ゲルとガラス界面の摩擦挙動を往復運動による strain sweep test を用いて、幅広いひずみ範囲で測定した。その結果、線形的な挙動から非線形的な挙動へと転移する臨界ひずみ強度 $\gamma_{max,c}$ を見出すことができた。続いてその挙動を詳細に調べるために、いくつかのひずみにおいて応力-ひずみリサージュ曲線を取得した。固定した PVA ゲルはフックの法則を表す直線状の応力-ひずみリサージュ曲線を示したが、摩擦系では傾いた楕円形を示し、 $\gamma_{max,c}$ を超えると平行四辺形のような歪んだ形状を示した。リサージュ曲線を解析するために、その面積から1サイクルで生じるエネルギー散逸密度 E_d を求めた。線形的な挙動に見えていた小さなひずみの範囲であっても、線形粘性体・線形弾性体と比較して摩擦系では大きな E_d だったことが分かった。さらに申請者は応力-ひずみリサージュ曲線の解析を進めるために、新たなパラメータ κ を定義し導入した。 κ は応力-ひずみリサージュ曲線の面積を、それが内接する長方形の面積で割って得られる数値であり、投入エネルギーに対する散逸エネルギーの割合を示したものである。線形粘性体や線形弾性体では幅広いひずみ範囲に対して κ の値に変化は見られなかったが、摩擦系では $\gamma_{max,c}$ を境に κ の数値が急激に増加した。これらの結果と界面観察の結果を合わせ、申請者はひずみが $\gamma_{max,c}$ より小さいときはゲルの表面分子の吸脱着による微視的な滑り、大きいときは界面全体が動く巨視的な滑りに変化することを見出した。

申請者は以上の解析方法を、濃厚ヒアルロン酸(HA)水溶液中でのゲルとガラス界面の摩擦挙動に適用した。HA はヒトの関節液に含まれる多糖であるので、関節の低摩擦機構解明への一助となると考えられる。まず、strain sweep test では摩擦応力低減効果の圧力依存性が確認された。また、水中で見出されたような $\gamma_{max,c}$ は、濃厚 HA 水溶液中では水中よりも2桁以上小さい値であった。そして応力-ひずみリサージュ曲線を用いた解析では、 κ の値が $\gamma_{max,c}$ を超えると急激に上昇した水中とは異なり、徐々に上昇していく挙動が得られた。これは、ゲルとガラスの界面に存在する薄い HA 水溶液層が非常に柔らかいゲルとなっており、見かけよりも大きなひずみを受けることによって非線形な挙動を生じているためであると考えられる。

また、申請者は濃厚 HA 水溶液中のゲルとガラス界面に形成されるパターンについても言及している。先行研究で行われていたのは一方向の回転運動下でのパターン観察であったが、申請者は往復運動下でも見られることを見出した。また、そのパターンが形成の閾値が往復運動のひずみ速度ではなく、ひずみ強度に存在している可能性を示した。

これらの結果を要するに、申請者は、ハイドロゲルの界面摩擦を測定データや界面観察により解析する中で、線形・非線形に関わらず評価可能なパラメーターの導入という新知見を得たものであり、今後のソフトマターの摩擦研究及び非線形現象に関する研究に対して貢献するところ大なるものがある。

よって申請者は、北海道大学博士（生命科学）の学位を授与される資格あるものと認める。