

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05149

研究課題名(和文) 高分子材料の異方的・非線形的変形に関する幾何学的モデル化と数値シミュレーション

研究課題名(英文) Geometric modeling and Monte Carlo simulations for anisotropic and non-linear deformation of polymeric materials

研究代表者

鯉淵 弘資 (Koibuchi, Hiroshi)

仙台高等専門学校・その他・名誉教授

研究者番号：00178196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：液晶エラストマや動物の皮膚などの応力ひずみ曲線に見られる非線形な挙動を、これまでの考え方とは全く異なるFinsler幾何(FG)の視点から、ポリマーに関する伝統的なモデルの枠組みのまま説明することができた。FGモデルは、方向依存の現象を扱える数学的枠組みを利用して申請者らが開発研究してきたものである。その中心的な考え方は、その現象に関係する方向自由度、例えば液晶分子の向き、によって局所的に材料の強さが変わるということである。これは、外力によって隣り合う分子間の相互作用の強さが変わるということであり、このことがFGモデルで実現できて、いろいろな実験結果を説明できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、材料の分子間に働く力の強さは一定と考えられてきた。一方、測定される力学的物性値はミクロには変動する物性値の平均値になると考えれば、ミクロなレベルでは一定でなくともよい。数学的には、分子間の相互作用は微分と関係し微分は距離と関係する。一方、Finsler幾何の仮定から、その距離は液晶分子の向きに応じて動的に変わる。その結果、外力によって液晶分子がある方向にそろえば、その向きの分子間力はそれと垂直方向とは大きく変わることになる。このような原理、即ち、分子間に働く力は制御できるものである、ことが様々な現象で成り立っていると確認できたことが学術的および社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：We successfully explain highly nonlinear behaviors in stress-strain curves of liquid crystal elastomer and animal skins from Finsler geometry (FG) viewpoint within the conventional model of polymers. The FG model has been developed and studied by the authors using a mathematical framework, which is applicable to direction-dependent phenomena. The key idea in the FG model is the assumption that material strength locally varies depending on directional degrees of freedom, such as the direction of liquid crystal molecules. This assumption implies that interaction strength between two neighboring molecules depends on external forces. This principle, which is realized in the FG model indicating that molecular interactions are controlled by external forces, allows us to explain many reported experimental data.

研究分野：計算物理学, 応用数学

キーワード：ポリマー 数学的モデル化 統計力学的モデル Monte Carloシミュレーション 離散Finsler幾何

1. 研究開始当初の背景

金属だけでなく、木材などの多孔質材料、Liquid Crystal エラストマ(LCE)、動物の筋肉や皮膚、などの応力-ひずみ曲線にも、プラトー部と呼ばれる非線形な領域が存在する。このプラトー部は、材料の変形に関わる重要な領域であり、定性的には結晶面のすべりや、液晶や高分子(ポリマー)のような方向自由度に関連する構造変化が原因であることが知られている。しかし、従来のモデルでは、初めから変形の異方性(例えば方向依存の非線形応力 or ポテンシャル)が仮定されているため、応力に関するプラトー現象は再現できるが、同じモデルで、例えば外部電場による異方的な変形現象まで説明できる訳ではない。この意味で、プラトーに関連する現象は十分に理解されているとはいえない。

2. 研究の目的

応力ひずみ曲線におけるプラトー部は、ソフトマテリアルのような弾性的な現象に限っても通常の弾性論が使えず、未解明といえる。そこで本研究では、この未解明な現象を、物質の変形は物質の幾何構造(計量)の変形が原因、という全く新しい視点で説明することを目的とする。これにより、従来別々の現象と考えられてきたものが共通の土台を持つことが分かり、その結果、より基本的なレベルでの機構が明らかになる。

3. 研究の方法

材料の分子論的(or 統計力学的)モデルでは、隣り合う分子間に引力などの相互作用が働いて、その結果、材料の強度が生まれる、と考える。さらに、これまでの伝統的な分子モデルでは、その分子間の相互作用の強さを表わす定数は一定と考えてられている。しかし、ある方向には破れやすい包装紙のように、その強さが方向依存の場合もある。この場合には、ポリマー分子の向きを破れやすい方向にそろえているためであることが分かっている。そこで、一般に物質内ではもともとミクロな分子間相互作用は方向依存になっていて、それがすべて同じ方向になったときに「その方向に破れやすい包装紙」になるのではないかと考える。

この考えを推し進めるには、分子間相互作用の連続的モデルから出発すれば見通しよくなる。連続的モデルでは、相互作用は数学的な「微分」を使って表わされる。その微分を差分化したときに、連続モデルは通常分子モデルになると考えるのである。そうすると、その微分が場所と方向依存になるためには、その場所での長さの基準となる「計量」が場所と向きに依存していれば十分なのが自然に分かる。しかも、材料内部の位置を局所座標系で表わせば、その局所座標系での距離は材料が置かれている 3 次元空間の普通の距離とは異なっても構わない。普通はこの微分のための距離も 3 次元空間の普通の距離と同じものを仮定する。それ以外のもの考える理由がないからであるが、ここでは、あえて普通ではない距離を仮定する。

局所座標系の計量を定義する方法としては、Finsler が行った方法(松本, 計量微分幾何学, 裳華房), 即ち、その局所座標軸方向に仮定されている「速さ」をその座標軸方向の新しい長さの基準に決める。例えば液晶エラストマの場合は、液晶分子の方向ベクトルを「速度ベクトル」として、その座標軸方向成分を用いる。それは、破れやすい包装紙のように、液晶分子の向きが一斉にそろくと力学的性質もその向きに依存すると考えられるからである。以上のような手続きで相互作用が方向依存になることが自然に理解できる。これが Finsler 幾何モデルまたは FG モデルの方法である (H.Sekino and H.Koibuchi, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.08.006>).

4. 研究成果

以下に述べるように、(1)動物の皮膚などを形成するコラーゲンファイバーの外力による変形、(2)液晶エラストマの電場による変形、(3)液晶エラストマの光照射による変形、(4)ゴムの外力による変形、の報告されている実験結果を Finsler 幾何モデルという全く新しいモデルで再現できた。それらのモデルは 2次元か3次元という次元の違いはあるものの、そのメカニズムは共通で「張力弾性エネルギーにおける張力の方向依存性が外的な刺激に応じて動的に発生する」あるいは「弾性的性質の異方性が外的な刺激により動的に発生する」ということである。また、これらの現象はすべて弾性変形であるから、この動的に発生した弾性的性質の異方性は外力を除くと消える。

(1) 動物の皮膚や筋肉の応力 ひずみ曲線

動物の皮膚や筋肉はコラーゲンファイバーと呼ばれる 1 次元状ではあるが複雑な内部構造をしたファイバー状繊維からできている。柔らかくて伸縮性に富み、その応力 ひずみ曲線はその形から J 曲線と呼ばれる。即ち、応力の増加なしでひずみが増大するプラトー部は応力ゼロのところにある。このプラトー部が存在するという意味では液晶エラストマの場合と同じである。そこで、いくつかの種類皮膚や筋肉を対象に FG モデルを適用し、その J 曲線がうまく再現できることを確かめた(論文 1,4, 国際会議論文 2)。

これらのコラーゲンファイバーのモデルにおいて、Finsler 計量の定義に必要な方向自由度はファイバーの向きとしている。これは液晶の場合の分子の向きに対応する。つまり、こ

ここで仮定していることは、皮膚や筋肉の応力はファイバーの向きに依存して変化する、ということだけであり、更に、その張力に対応する弾性エネルギーは液晶エラストマ(LCE)の場合と全く同じある(図1参照)。

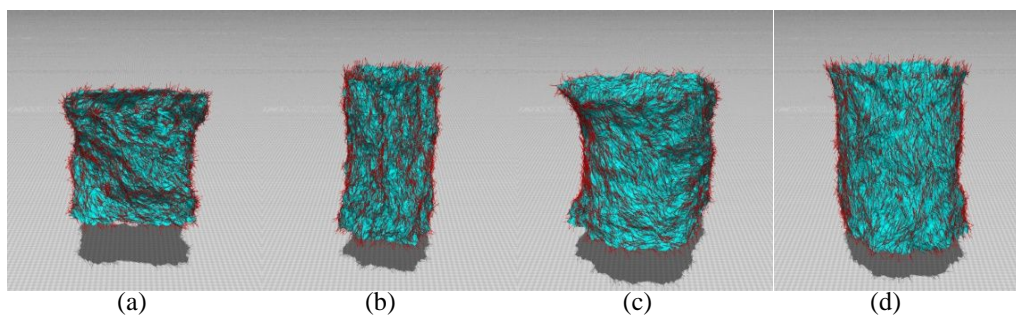


図1 計算に用いた円筒形の3角形分割格子のスナップショット。上下面をz方向に固定して、その応力を数値的に測定する。図の赤い細い棒はコラーゲンファイバーの向きを表わす内部方向自由度。

(2) 液晶エラストマ(LCE)の外部電場応答

LCEはポリマーと液晶分子が化学的に結合した物質で、電場をかけると液晶分子が電場の向きに配向し、それに伴ってポリマーが変形する。その結果、全体の形が変形する。本研究では、既に報告されているK.Urayama(Phys. Rev. E 2005, Macromol. 2005, 2006)らの変形ひずみ-電場曲線の実験結果を、Finsler幾何モデルを使って再現した(図2参照)。そのモデルでは、(1)のコラーゲンファイバーと同じく、張力弾性エネルギーの張力定数が液晶分子の向きに依存して動的に変わる。これは、ミクロなポリマー分子の張力相互作用を電場によって変化させることでマクロな変形が起こるとい物質変形のマカニズムを表わしている。同時に、これまで一定と考えられていた分子間相互作用が外力で制御できるということのモデルでもある(論文2, 国際会議論文1, 3, 4)。

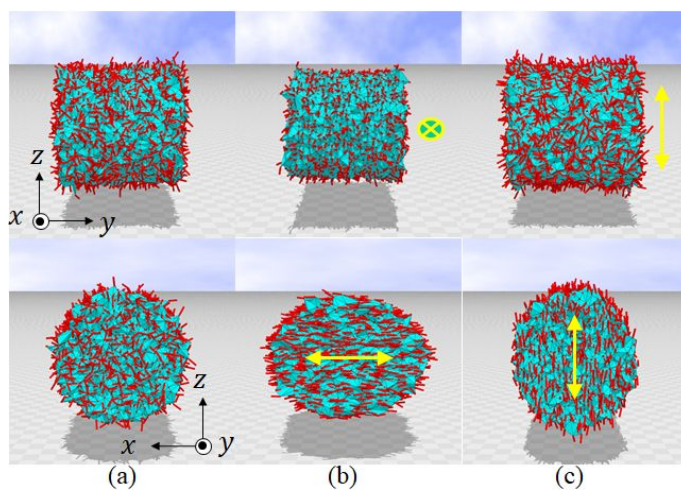


図2 計算に用いた円柱形の4面体分割格子と液晶の向きを表わす内部方向自由度のスナップショット。(a)外部電場がゼロ、(b)外部電場がx方向、(c)外部電場がz方向。矢印は電場方向を表わす。(b)ではx方向に伸びているため、y,z方向には縮んでいる。(c)ではz方向に伸びているため、x,y方向には縮んでいる。

(3) 液晶エラストマ(LCE)の光照射応答

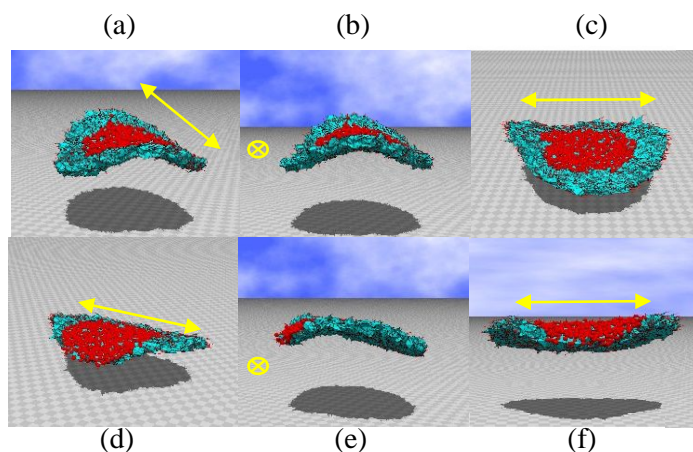


図3 4面体で分割した薄いdiskのスナップショット。赤い部分が光が当たっている場所で矢印が液晶分子の向き。光が当たっている場所が移動すると、LCE小片が水をかくように変形し水面を動く。(a)-(c)光が中央に当たっている場合の変形、(d)-(f)光がdiskの端の方に移動した場合の変形。

水に浮かべた LCE の小片がレーザー光の照射とその照射点の移動で水面を動き回るとい
う M.Chamacho-Lopez (Nat. Mater. 2004, 3, 307-310) らの実験における LCE の変形を FG
モデルで再現した。この実験は光エネルギーが機械的エネルギーに直接変換できることを
示した点で注目された。光エネルギーは太陽電池のように機械エネルギーに変換される前
に電気エネルギーに変換され、変換効率がその都度下がるからである。

LCE は室温で液晶分子がある方向にそろっているものを用いている。その変形メカニズム
は、光が照射されることでその部分の温度が上がり、液晶分子の向きが等方的またはランダム
になることで、分子間距離は平均して一定となって異方性は無くなる。その結果、もとも
と液晶分子がそろっている方向（それと垂直方向）に延びていた（縮んでいた）分子間距離
が、平均して縮む（伸びる）ことになる。これにより、LCE 小片は図 3 のような形になる。
この複雑な現象の Finsler 幾何モデルも、(1), (2) のモデルと同一である。

温度の効果を取り込むには、温度が高いと液晶分子の向きがランダムになることに注意
する。即ち、物体のある部分の温度が高いということを実現するには、光が照射された部分
の液晶間相互作用の強さをゼロにする。そうすると、その部分の液晶分子の向きがランダム
に分布する（論文 3）。

(4) ゴムの応力 - ひずみ曲線

ゴムの研究は歴史も長く、その変形のメカニズムもエントロピー弾性など基本的なこ
とはある程度解明され、工業的な利用において求められる固くてしなやかという 2 つの相反
する性質を目指して様々な研究がなされている。ゴムの応力 - ひずみ曲線にも LCE など
同じようにプラトー部がみられる。そこで、この複雑な問題に上記(1), (2), (3)と同じモデル
を適用した。ただし、張力弾性エネルギーには通常の伸びの 2 乗の項に加えて 4 乗の項も
含めている。厚みのある円筒を 4 面体で分割した格子を用い、既に報告されている応力 - ひ
ずみ曲線で最大 1200% のひずみを再現した(図 4 参照)。この場合、内部の方向自由度として
はポリマー分子の向きを対応させる。この場合も、内部自由度の向きで応力が変わるとい
うことを Finsler 幾何モデルで実現している（論文 5, 国際会議論文 5, 6, 7）。

更に、ゴムには応力誘起結晶化という現象があり、このことが応力 - ひずみ曲線の形に影
響している。そこで、結晶化したゴム分子は弾性エネルギーを担わないというような直感的
なモデルにより、論文 5 で対象とした実験結果を再現した。このことは論文 5 の Finsler 幾
何モデルで実現される「張力定数が方向依存になる」ことで、応力誘起結晶化のような複雑
な現象が絡む場合でも、その応力 - ひずみ曲線を説明できることを意味している（論文 6,
国際会議論文 8）。

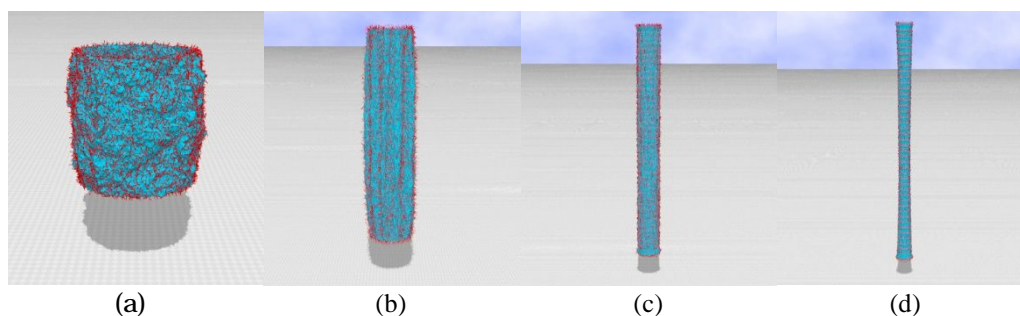


図 4 4 面体で分割した薄い円筒のスナップショット。表面の赤い棒はポリマーの向きを表す内部自由
度。上下面を z 方向に動かないように固定して、応力を数値的に測定している。ひずみ ε は (a) $\varepsilon = 0[\%]$,
(b) $\varepsilon = 358[\%]$, (c) $\varepsilon = 800[\%]$, (d) $\varepsilon = 1290[\%]$ 。

参考論文

- (1) Yu Takano and Hiroshi Koibuchi, J-shaped stress-strain diagram of collagen fibers: Frame tension of triangulated surfaces with fixed boundaries, Physical Review E 95, 042411(1-11) (2017) <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.042411>
- (2) Proutorov Evgenii, Matsuyama Naoki, Koibuchi Hiroshi, Finsler geometry modeling and Monte Carlo study of liquid crystal elastomers under electric fields, Journal of Physics: Condensed Matter 30, 405101(1-13), (2018) <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aadcba>
- (3) Koibuchi Hiroshi, Bending of Thin Liquid Crystal Elastomer under Irradiation of Visible Light: Finsler Geometry Modeling, Polymers 10, 757(1-16) (2018) <https://doi.org/10.3390/polym10070757>
- (4) Mitsuhashi Kazuhiko, Ghosh Swapn, Koibuchi Hiroshi, Mathematical Modeling and Simulations for Large-Strain J-Shaped Diagrams of Soft Biological Materials, Polymers 10, 715(1-18), (2018) <https://doi.org/10.3390/polym10070715>

- (5) Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Gildas Diguët, Gael Sebald, Jean-Yves Cavaille, Toshiyuki Takagi, Laurent Chazeau, Monte Carlo Study of Rubber Elasticity on the Basis of Finsler Geometry Modeling, *Symmetry* 11, 1124(1-22) (2019) <https://doi.org/10.3390/sym11091124>
- (6) Egorov Vladislav, Koibuchi Hiroshi, Bernard Chrystelle, Chenal Jean-Marc, Diguët Gildas, Sebald Gael, Cavaille Jean-Yves, Takagi Toshiyuki, Chazeau Laurent, Coarse-Grained Lattice Modeling and Monte Carlo Simulations of Stress Relaxation in Strain-Induced Crystallization of Rubbers, *Polymers* 12, 1267 (2020) <https://doi.org/10.3390/polym12061267>

参考国際会議論文

- (1) H. Koibuchi, Finsler geometry modeling of elongation of flexible materials under external electromagnetic field, *Ferroelectrics* (Proceedings of Second International Workshop Modern Nanotechnologies, IWMN-2016) 144-150, <https://doi.org/10.1080/00150193.2017.1289765>
- (2) Yu Takano, Hiroshi Koibuchi, FINSLER GEOMETRY MODELING FOR J-SHAPED STRESS-STRAIN DIAGRAM OF COLLAGEN FIBER NETWORKS, *Journal of International Scientific Publications* 11, 207-215 (Proceedings of Materials, Methods & Technologies 2017, Bulgaria), <https://www.scientific-publications.net/get/1000024/1501345647146169.pdf>
- (3) E. V. Proutorov, H. Koibuchi, MONTE CARLO STUDIES ON ELONGATION OF LIQUID CRYSTAL ELASTOMERS UNDER EXTERNAL ELECTRIC FIELD, *Journal of International Scientific Publications* 11, 198-206 (Proceedings of Materials, Methods & Technologies 2017, Bulgaria) <https://www.scientific-publications.net/get/1000024/1501345621190295.pdf>
- (4) E. V. Proutorov, H. Koibuchi, MONTE CARLO SIMULATIONS OF LIQUID CRYSTAL ELASTOMER UNDER ELECTRIC FIELDS, *Journal of International Scientific Publications* 12, 1-8 (Proceedings of Materials, Methods & Technologies 2018, Bulgaria) <https://www.scientific-publications.net/get/1000030/1536243086289123.pdf>
- (5) Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Gildas Diguët, Jean-Yves Cavaille, Gael Sebald, Toshiyuki Takagi, Laurent Chazeau, Mathematical modeling and simulations of soft-elastic materials under large strain, 2018 Proceedings of International Conference on Flow Dynamics 2018 (USB) 848-849
- (6) Koibuchi Hiroshi, Bernard Chrystelle, Chenal Jean-Marc, Diguët Gildas, Sebald Gael, Cavaille Jean-Yves, Takagi Toshiyuki, Chazeau Laurent, Mathematical Modeling of Rubber Elasticity, *Journal of Physics: Conference Series* 012081(1-8) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1141/1/012081>
- (7) KOIBUCHI Hiroshi, Mathematical modeling and simulations of soft-elastic materials under large strain, International Conference on Flow Dynamics 2018 (仙台) (国際学会)
- (8) Hiroshi Koibuchi, Vladislav Egorov, Olga Maximowa, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Olivier Lame, Gildas Diguët, Gael Sebald, Jean-Yves Cavaille, Toshiyuki Takagi and Laurent Chazeau, Coarse-grained Modeling and Monte Carlo Study of Strain Induced Crystallization of Rubbers, Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Fluid Information (AFI-2019) OS20-3, 218-219 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 S. El Hog, F. Kato, H.Koibuchi, H.T. Diep	4. 巻 498
2. 論文標題 Skyrmions on 2D elastic surfaces with fixed boundary frame	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 166095(1-14)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2019.166095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Gildas Diguët, Gael Sebald, Jean-Yves Cavaille, Toshiyuki Takagi, Laurent Chazea	4. 巻 11
2. 論文標題 Monte Carlo Study of Rubber Elasticity on the Basis of Finsler Geometry Modeling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Symmetry (invited)	6. 最初と最後の頁 1124(1-22)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym11091124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hiroshi Koibuchi	4. 巻 596
2. 論文標題 Surface tension of membranes depending on the boundary shape	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physica A	6. 最初と最後の頁 12096(1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2019.04.196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hiroshi Koibuchi, Sahbi EL Hog, Vladislav Egorov, Fumitake Kato, Hung T. Diep	4. 巻 1391
2. 論文標題 Mathematical modeling of skyrmion shape deformation under uni-axial stresses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012013(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1391/1/012013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 V I Egorov, O G Maksimova, H Koibuchi, G Jug, C Bernard, J-M Chenal, O Lame, G Diguët, G Sebald, J-Y Cavaille, T Takagi	4. 巻 1391
2. 論文標題 Finsler geometry modeling of reverse piezoelectric effect in PVDF	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012014(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1391/1/012014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroshi Koibuchi, Vladislav Egorov, Olga Maximowa, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Olivier Lame, Gildas Diguët, Gael Sebald, Jean-Yves Cavaille, Toshiyuki Takagi and Laurent Chazeau	4. 巻 0S20-3
2. 論文標題 Coarse-grained Modeling and Monte Carlo Study of Strain Induced Crystallization of Rubbers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Fluid Information (AFI-2019)	6. 最初と最後の頁 218-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Vladislav Egorov, Hiroshi Koibuchi, Olga Maximowa, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Olivier Lame, Gildas Diguët, Gael Sebald, Jean-Yves Cavaille and Toshiyuki Takagi	4. 巻 CRF-42
2. 論文標題 Simulation of reverse piezoelectricity in ferroelectric polymers by Finsler geometry model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Fluid Information (AFI-2019)	6. 最初と最後の頁 84-85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shobukhov Andrey, Koibuchi Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Parallel Tempering Monte Carlo Studies of Phase Transition of Free Boundary Planar Surfaces	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 1360(1-18)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym10121360	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Proutorov Evgenii、Matsuyama Naoki、Koibuchi Hiroshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Finsler geometry modeling and Monte Carlo study of liquid crystal elastomers under electric fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 405101(1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aadcba	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Koibuchi Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Bending of Thin Liquid Crystal Elastomer under Irradiation of Visible Light: Finsler Geometry Modeling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 757(1-16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym10070757	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Gildas Diguët, Jean-Yves Cavaille, Gael Sebald, Toshiyuki Takagi, Laurent Chazeau	4. 巻 0817
2. 論文標題 Mathematical modeling and simulations of soft-elastic materials under large strain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Flow Dynamics 2018 (USB)	6. 最初と最後の頁 848-849
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mitsuhashi Kazuhiko、Ghosh Swapan、Koibuchi Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Mathematical Modeling and Simulations for Large-Strain J-Shaped Diagrams of Soft Biological Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 715(1-18)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym10070715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koibuchi Hiroshi, Bernard Chrystelle, Chenal Jean-Marc, Diguet Gildas, Sebald Gael, Cavaille Jean-Yves, Takagi Toshiyuki, Chazeau Laurent	4. 巻 1141
2. 論文標題 Mathematical Modeling of Rubber Elasticity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012081(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1141/1/012081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Evgenii Proutorov and Hiroshi Koibuchi	4. 巻 12
2. 論文標題 MONTE CARLO SIMULATIONS OF LIQUID CRYSTAL ELASTOMER UNDER ELECTRIC FIELDS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials, Methods & Technologies, Journal of International Scientific Publications	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yu Takano and Hiroshi Koibuchi	4. 巻 95
2. 論文標題 J-shaped stress-strain diagram of collagen fibers: Frame tension of triangulated surfaces with fixed boundaries	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 042411(1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.95.042411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Proutorov Evgenii, Koibuchi Hiroshi	4. 巻 6
2. 論文標題 Orientation Asymmetric Surface Model for Membranes: Finsler Geometry Modeling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Axioms	6. 最初と最後の頁 10(1-17)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/axioms6020010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 H.Koibuchi	4. 巻 508, 1
2. 論文標題 Finsler geometry modeling of elongation of flexible materials under external electromagnetic field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Ferroelectrics (Proceedings of Second International Workshop Modern Nanotechnologies, IWMN-2016)	6. 最初と最後の頁 144-150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00150193.2017.1289765	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Proutorov Evgenii, Koibuchi Hiroshi	4. 巻 936
2. 論文標題 Finsler Geometry Modeling of an Orientation-Asymmetric Surface Model for Membranes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conf. Series (Proceedings of IC-MSQUARE 2017: International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences)	6. 最初と最後の頁 012038(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/936/1/012038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yu Takano, Hiroshi Koibuchi	4. 巻 11
2. 論文標題 FINSLER GEOMETRY MODELING FOR J-SHAPED STRESS-STRAIN DIAGRAM OF COLLAGEN FIBER NETWORKS	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of International Scientific Publications (Proceedings of Materials, Methods & Technologies 2017, Bulgaria)	6. 最初と最後の頁 207-215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 E. V. Proutorov, H. Koibuchi	4. 巻 11
2. 論文標題 MONTE CARLO STUDIES ON ELONGATION OF LIQUID CRYSTAL ELASTOMERS UNDER EXTERNAL ELECTRIC FIELD	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of International Scientific Publications (Proceedings of Materials, Methods & Technologies 2017, Bulgaria)	6. 最初と最後の頁 198-206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 KOIBUCHI Hiroshi
2. 発表標題 Mathematical modeling of polymeric materials: Finsler geometry models and Monte Carlo simulations
3. 学会等名 15th International Workshop on Complex Systems (イタリア, トレント) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 KOIBUCHI Hiroshi
2. 発表標題 Mathematical modeling and simulations of soft-elastic materials under large strain
3. 学会等名 International Conference on Flow Dynamics 2018 (仙台) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 KOIBUCHI Hiroshi
2. 発表標題 Mathematical Modeling of Rubber Elasticity
3. 学会等名 International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences 2018 (モスクワ, ロシア) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 KOIBUCHI Hiroshi
2. 発表標題 Monte Carlo simulations of liquid crystal elastomer under electric fields
3. 学会等名 Materials, Methods & Technologies 2018(ブルガリア) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Koibuchi 鯉淵 弘資
2. 発表標題 Bending under Light Illumination of Liquid Crystal Elastomer: Finsler Geometry Modeling
3. 学会等名 Polymers-2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Koibuchi 鯉淵 弘資
2. 発表標題 Mathematical modeling and Monte Carlo study on elongation of liquid crystal elastomer under external electric fields (keynote lecture)
3. 学会等名 23rd International Conference on Nanomaterials and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Koibuchi 鯉淵 弘資
2. 発表標題 Finsler Geometry Modeling of an Orientation-Asymmetric Surface Model for Membranes
3. 学会等名 IC-MSQUARE 2017: International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	INSA Lyon			
ロシア連邦	Cherepovets State University			
フランス	Cergy-Pointoise University			
ロシア連邦	Chrepovets State University			
ロシア連邦	Moscow State University			
フランス	INSA Lyon, CNRS, University of Lyon			
Russian Federation	Cherepovetsu State University			