

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14360

研究課題名（和文）不均一材料の熱活性破壊における亀裂構造とダイナミクスに関する統計物理学的研究

研究課題名（英文）Statistical physics on structure and dynamics of microcracks in thermally activated breakdown of heterogeneous materials

研究代表者

吉岡 直樹 (Yoshioka, Naoki)

国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：10548209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：熱活性fiber-bundle模型のフレームワークを用いて、不均一材料の熱活性クリープ破壊に関し、特に微小破壊の発生地点に着目して研究を行った。応力集中がもたらす破壊過程の変化を特徴づけるため、correlation integralとjump distance distributionに注目した。前者について、系の破断が近づくと、微小破壊の発生についてフラクタルな構造が観られることが分かった。また、後者について、非自明な統計分布を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果は、破壊過程が進むことで応力集中が発生した際、微小破壊の構造を特徴づける量に着目すると、自明な状態から非自明な状態に変化する様子が観測できることを示している。系のパラメタによるところはあるが、この成果は材料の破断を、微小亀裂の発生地点に関する統計量から予測する可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）：We study thermally activated creep fracture of heterogeneous materials by using so-called thermally activated fiber-bundle models. In this study, in order to characterize change of fracture process due to stress concentration, we concentrate on correlation integral and jump distance distribution of epicenters. The results about correlation integral suggests fractal structures of microcracks appear in the vicinity of catastrophic breakdown. Meanwhile, we find nontrivial power-law distributions of jump distance of epicenters.

研究分野：計算統計物理学

キーワード：破壊現象 非平衡物理学 計算統計物理学

### 1. 研究開始当初の背景

破壊現象は日常的に様々な材料において力学的化学的負荷がかかることによって生じる。その品質を保つため、いかにして亀裂を生じにくくするか、建築物の破局的な崩壊をいかにして予測するか、あるいは逆に、加工を目的としていかに効果的に破碎されるよう材料を設計するかなど、破壊に関する研究の重要性は枚挙にいとまがない。また、このような工学的な側面のみならず、自然現象においても破壊現象の研究は重要である。例えば、岩盤や地層は長い年月をかけて亀裂が生じる。これらは亀裂の両側にずれがない場合は節理、ある場合は断層と呼ばれ、特に断層の運動が地震の主原因となることから、このような系の破壊現象を理解することは社会的意義が非常に大きい。一方、物理学や数理科学の立場から見ると、破壊現象は典型的な非線形非平衡現象であり、微視的な基本法則から統計物理学的手法を用いて破壊現象、特に現象論的な破壊則を理解することは、決して容易ではないがきわめて挑戦的な課題である。

### 2. 研究の目的

不均一材料の熱活性クリープ破壊に関する統計物理学的な研究を行う。Fiber-bundle 模型と呼ばれる簡略化したモデルを用い、数値実験を主とした研究を遂行する。クリープ破壊によって生じる亀裂の幾何学的構造、特に亀裂の発生地点間距離に注目し、その統計分布が温度や外部応力、材料のパラメタなどによってどのように変化するか、さらにその時間依存性がどうなるか、系統的に調べる。これらの結果から、破局的崩壊の予測が可能かどうか、特に実際の実験系での実現性について議論する。

### 3. 研究の方法

熱活性 fiber-bundle 模型を用い、シミュレーションを主たる手段として研究を遂行した。このモデルでは、正方格子状に並んだファイバーの束が二枚のプレートをつないでいるという状況を考える。このプレートにファイバーと同じ向きに応力を与えると、各ファイバー  $i$  についても荷重  $i(t)$  がかかる。ここで、荷重により生じたひずみ  $i(t) = i(t) / E$  が“ファイバーの破壊条件”  $E i(t) + i(t) > i^{th}$  を満たすときそのファイバー  $i$  は壊れ、かかっていた荷重  $i(t)$  は“荷重再分配則”に従い他のファイバーに移るとする。ここで、 $i(t)$  は熱揺らぎであり、温度  $T$  を分散とした平均 0 の正規分布に従う時間に依存する確率変数である。また、 $i^{th}$  は各ファイバーの強度であり、 $[0, i^{th})$  の範囲の一様分布、あるいは Weibull 分布  $p(x) = (m/x^m) (i^{th}/x)^{m-1} \exp(-(i^{th}/x)^m)$  に従う確率変数である。荷重の再分配に伴い、破壊条件を満たすファイバーが新たに出てくる可能性があるため、再びファイバーの破壊と荷重の再分配を行う。これを新たに壊れるファイバーが無くなるまで繰り返す。なお、クリープ破壊を調べるため、外力  $F = \sum i(t)$  は一定であるとする。

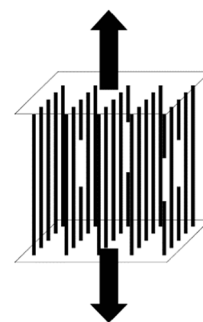


図 1 Fiber-bundle 模型の模式図。

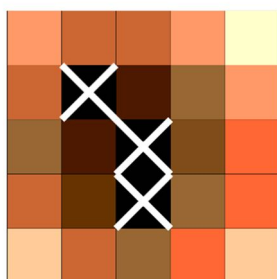


図 2 荷重の再分配。色は荷重の大きさを表す。

荷重再分配則としては、主にべき乗則のものを考える。起点となる壊れたファイバー  $i$  から、まだ繋がっているファイバー  $j$  までのユークリッド距離を  $r_{ij}$  とすると、ファイバー  $j$  の荷重の増加分  $f_j$  は  $f_j \propto r_{ij}^{-\alpha}$  とする。ここで、 $\alpha$  は応力集中の起こりやすさを表すパラメタで、 $\alpha = 0$  ならば equal load sharing rule (平均場近似) に、 $\alpha > 0$  で local load sharing rule (最近接のファイバーにのみ荷重が分配される) となる。

この熱活性 fiber-bundle 模型について大規模な数値実験による研究を行った。各ファイバーの材料特性として最も簡単な線形弾性モデルを選んだとしても、温度  $T$ 、外部応力  $\sigma$ 、壊れたファイバーにかかっていた荷重が他のファイバーに移る際の距離依存性にかかわるパラメタ  $\alpha$ 、各ファイバー強度の確率分布とそれに関するパラメタ  $m$  ということ、少なくとも 4 つのパラメタを考慮する必要がある。この研究を実現するために、申請者らが最近考案した event-driven な計算手法を用いる。この手法によりパラメタによっては指数関数的に計算時間が増大していた以前の手法に比べ、はるかに高速にシミュレーションを行えるようになり、本研究のような広大なパラメタ空間の網羅的な調査が可能となった。

### 4. 研究成果

ファイバーバンドル模型のフレームワークを用いて、不均一材料の熱活性クリープ破壊に関し、特に亀裂の発生地点間距離について研究を行った。我々が最近提案した、動的モンテカルロ法による数値計算を用い、温度  $T$ 、外部応力  $\sigma$ 、そして、材料特性の一つとして、壊れたファイ

バーにかかっていた荷重が他のファイバーに移る際の距離依存性に関わるパラメータを様々な値に変えてシミュレーションを行った。

図3は  $T=0.01$ ,  $\alpha=0.1$ ,  $\beta=2.0$  での微小破壊の発生地点(epicenter)の様子を表す。それぞれの円の位置は、シミュレーション中に発生した微小破壊の epicenter を表す。また、円の大きさとは色は、その破壊により壊れたファイバーの総数(バーストサイズ)を表している。破壊過程の初期段階においては、バーストサイズの小さい破壊イベントが支配的で、これがほぼランダムな位置で起こる。しかしながら、破壊過程の後期段階になると、応力集中が起こり、その結果として近い個所で大きな破壊イベントが起こるようになることが分かる。

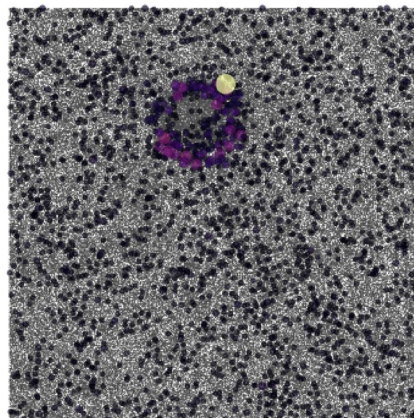


図3 微小破壊発生地点の変化。円の位置が微小破壊の発生地点、円の大きさは壊れたファイバーの数を表す。

この観察を定量化するため、correlation integral という量  $C(r)$  を測定した。ここで、 $n$  回の連続して発生した微小破壊イベントについて、距離  $r$  以内にある epicenter のペアの数を  $N(<r)$ 、epicenter のペアの総数を  $N_p = N(< \infty) = n(n-1)/2$  とすると、correlation integral は  $C(r) = N(<r) / N_p$  で定義される。この

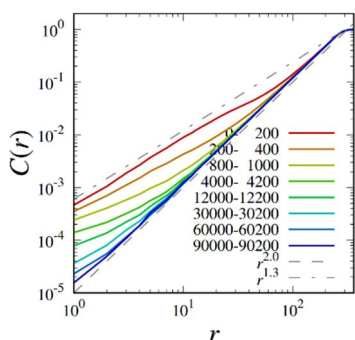


図4 Correlation integral. 各曲線は、青が破壊過程初期、赤が破断寸前を表す。

correlation integral は花崗岩の破壊実験や離散要素法による破壊シミュレーションなどで過去に調べられており、材料が破断する直前になると、 $C(r) \sim r^D$  ( $D$  は非整数) というように微小亀裂のフラクタル性を示す結果が報告されている。この correlation integral について我々の熱活性 fiber-bundle 模型について調べた結果の一例として、 $T=0.01$ ,  $\alpha=0.1$ ,  $\beta=2.0$  での結果を図4に示す。ここで、青の曲線は破壊過程の初期段階における correlation integral であり、 $C(r) \sim r^{2.0}$  となっている。これは、系が2次元であるため、微小破壊イベントの間に相関がなく、ランダムに発生していることを意味している。一方、破壊過程の後期段階、系が破断する寸前になると、図4の赤い曲線のように、近距離において  $C(r) \sim r^{1.3}$  となることが分かった。このように、 $D = 2.0$  から  $D < 2.0$  に変化する振る舞いは、 $D = 2.0$  であれば観測できた。ただし、 $\beta = 5.0$  のように  $\beta$  の値が大きくなりすぎると、 $D = 2.0$  からずれるような  $r$  の範囲が非常に小さくなり、 $D$  の値を議論するのは難しくなる。とにかく、 $\beta = 2.0$  で  $D$  の変化が観測できる範囲内

では、 $D$  の値はおよそ 1.5 あたりになることが分かった。一方で、 $\beta = 1.0$  の場合、correlation integral のフラクタル性は一切観られなかった。荷重が長距離へ伝わるようになると、系のふるまいが平均場のダイナミクスようになり、応力集中がほとんど起こらなくなることを意味している。

また、epicenter の jump distance distribution を調べた。ここで、 $i$  番目(時刻  $t_i$ ) の破壊イベントについて、 $n$  番目の epicenter の jump distance  $r_n$  は  $r_n = |r(t_{n+1}) - r(t_n)|$  により定義される。Epicenter の jump distance distribution は、例えば地震の震源間距離について調べられており、 $r$  というようにべき分布になることが知られている。熱活性 fiber-bundle 模型において調べた結果の一例として、 $T=0.01$ ,  $\alpha=3.0$  での結果を図5に示す。応力  $\sigma$  が大きい場合、jump distance distribution  $D(r)$  は  $D(r) \sim r^{1.0}$  という振る舞いを示す。これは、ランダムに破壊イベントが発生する場合、距離が  $r$  から  $r + dr$  の範囲に破壊イベントが発生する確率が  $2 \cdot dr/r$  となることから、自明なべき分布であると言える。一方、応力  $\sigma$  が小さくなると、 $r$  が小さい場合に、 $D(r) \sim r^{1.5}$  という非自明なべき分布となることが分かった。

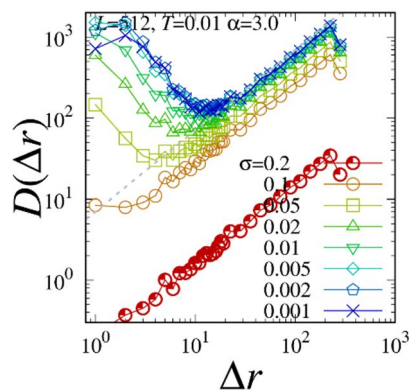


図5 Epicenter についての jump distance distributions.

さらに、epicenter の jump distance distributions についてより詳細な理解を得るため、その時間変化を調べた。Correlation integral と同様に、 $n$  回の連続して発生した微小破壊イベントについて epicenter の jump distribution を調べた。ここで、一例として、 $T=0.01$ ,  $\alpha=0.01$ ,  $\beta=2.0$  での結果を図6に示す。図6左の青い曲線が破壊過程の初期段階での jump distance distributions であり、やはり  $r^{1.0}$  という自明な分布である。時間が経過するにつれ、緑の曲線のような  $r^{1.5}$  という非自明な分布に移り変わる様子が観られた。しかしながらこれで終わりではなく、さらに時間が経過すると、図6右のように緑の曲

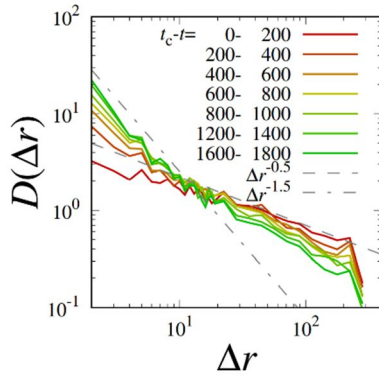
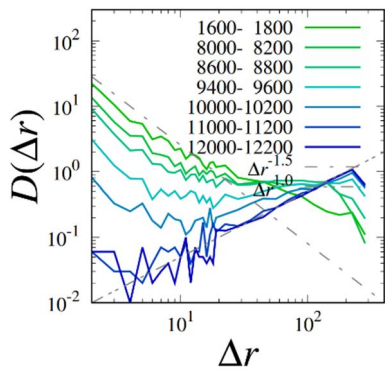


図 6 Epicenter の jump distance distribution の時間変化。

distribution を調べていた時には非自明なべき分布が観られなかった高応力の場合についても、今回のように time window を設けて時間変化を調べてみると、破断が近づくことで非自明なべき分布が測定できるようになった。指数の値自体はパラメタに依存しているものの、今回の jump distance distributions に関する結果は、時間変化を追うことで非自明なべき分布が生じることによる破断の予測につながる可能性が期待できる。

線で表される  $r^{-1.5}$  の非自明な分布から、赤の曲線で表される  $r^{-0.5}$  という、これまで観られていなかった非自明なべき分布に移り変わることが分かった。このような jump distance distributions の時間変化の様子は、 $\alpha$  の値を変えても生じることが分かった。特に、時間変化を考えずにすべての破壊イベントについて jump distance

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 熱活性破壊における微小亀裂発生点の統計分布
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 Epicenter jump and burst size in thermally induced cracking of fiber bundles
3. 学会等名 9th Hungary-Japan Bilateral Workshop on Statistical Physics of Breakdown Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 Jump statistics of epicenters in thermally induced cracking of fiber bundles
3. 学会等名 MMM2018, The 9th International Conference on Multiscale materials Modeling (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 Jump distance distributions of epicenters in thermally induced cracking of fiber bundles
3. 学会等名 Naha Workshop on Fracture Dynamics and Structure of Cracks (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 Kinetic Monte Carlo algorithm for thermally induced breakdown of fiber bundles
3. 学会等名 The 4th International Workshop on Physics of Social Complexity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 熱活性破壊のファイバーバンドル模型における亀裂生成の空間分布
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 Jump distance of epicenters in thermally induced cracking
3. 学会等名 8th Hungary-Japan bilateral Workshop on Statistical Physics of Breaking Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉岡直樹、フェレンツ・クン、伊藤伸泰
2. 発表標題 Jump distance of epicenters in thermally induced cracking
3. 学会等名 Fukui Workshop on Fracture dynamics and Structure of Cracks (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------