

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05675

研究課題名(和文) 高速き裂分岐現象が衝撃破砕のべき乗質量分布側に果たす役割の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental study on function of rapid crack bifurcation to power law in impact fracture

研究代表者

鈴木 新一 (Suzuki, Shinichi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・シニア研究員

研究者番号：60135415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高速多重分岐き裂によって発生する破砕片の質量分布に関して、3つの研究を実施した。一つは、累積質量分布に対する実験装置の大きさや測定限界の影響を取り込んだ理論の構築であり、円盤試験片の衝撃落下試験によりその妥当性を検証した。二つ目は、高速多重分岐き裂のエネルギー解放率を測定する方法の開発である。破砕片の質量分布は多重分岐き裂のエネルギー解放率に関連していると予想されるが、それを測定する方法が存在しなかった。本研究は、その方法を確立した。3番目は、一様引張応力下の高速多重分岐き裂によって発生する破砕片の質量分布測定である。これにより、最も単純な力学的環境下における質量分布を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The present study carried out three kinds of studies on the mass distribution of fragments generated by multiple bifurcation of fast propagating cracks. The first is to make a theory that includes the effect of the limits of measurement accuracy and the limit of the scale of experimental apparatus. The theory was confirmed by the experiments. The second was to develop measurement method of energy release rate of multiply bifurcating crack. The fragment mass distribution generated by multiple bifurcation is thought to depend on energy release rate of the crack. But, there was no methods to measure the energy release rate of multiple bifurcating crack. The present study developed a method to estimate the energy release rate of multiply bifurcating cracks. The third was the measurement of fragment mass distribution generated by multiply bifurcating cracks under uniform tensile stress field. This experiment figures out fragment mass distribution under the simplest stress field.

研究分野：工学・機械工学・材料力学

キーワード：破壊力学 脆性破壊 衝撃工学 き裂進展 分岐 多重分岐 応力拡大係数 エネルギー解放率

1. 研究開始当初の背景

衝撃破砕における破片の質量分布のべき乗則： 衝撃破壊における破片の質量分布にはべき乗則が現れることがある。破砕片の質量分布は、鉱石の粉碎や小惑星の質量分布に関係して以前から研究されていたが、1990年代前半に実施された衝撃破壊実験において、破片の質量分布にべき乗則が現れることが明らかとなり、世界的な関心を呼んだ。しかし、べき乗則成立の力学的機構は未だ解明されていない。

累積質量分布における折れ曲りの存在： 破砕片の質量分布の測定においては、累積質量分布を測定する方法が広く用いられている。これまでの研究から累積質量分布の中には折れ曲りが存在していることが知られているが、その発生機構は未だ解明されていない。

エネルギー解放率： 1990年代以降、衝撃破砕片の質量分布に関する研究は、主に物理学における自己組織化の観点から進められており、材料力学的方法は殆ど用いられていない。そのため、落下試験において地面に衝突する直前の運動エネルギーは問題にされているものの、破壊が進行しているときのき裂のエネルギー解放率は全く研究されていない。

高速き裂分岐： 脆性材料が衝撃的に破壊する際には、数百 m/s 以上の高速で進展するき裂が発生する。き裂速度が十分速いとき、き裂は突然二つに分岐する。また、破壊に必要なエネルギーが材料中に十分蓄えられている場合、何度も分岐を繰り返す「多重分岐」が発生する。この高速き裂分岐とその関連現象の解明は、破壊現象の予測を可能にするうえで重要な課題である。

多重分岐と質量分布の関係： き裂の多重分岐は複数の破砕片を生み出すが、その質量分布に関する実験的研究は、未だ実施されていない。僅かにシミュレーション研究があるものの、シミュレーションの前提条件が現実のき裂とかけ離れている。理論とシミュレーションの指標となる実験データを整備する必要がある。

前述のように、衝撃破壊における破砕片質量分布に関しては、主に物理学の観点から進められており、材料力学的方法は殆ど用いられていない。そのため、材料力学的観点から見た場合、材料力学の基礎方程式から衝撃破砕片のべき乗則に至るまでの中間の力学的機構が全く解明されていない。本研究は、衝撃破壊における破砕片質量分布を材料力学的視点から実験的に解明しようとするものである。

2. 研究の目的

本研究は、衝撃破壊における破砕片質量分布のべき乗則の力学的機構を解明するために、以下の研究を実施する。

(1) 実験装置の大きさと測定器の測定限界を考慮した理論の構築： 衝撃破壊で発生する最大の破砕片は、元の物体の大きさを越えることがない。すなわち、発生する破砕片の

大きさには、常に上限が存在する。また、破砕片質量の測定においては、測定器で測定できる質量には下限が存在する。従来の質量分布の測定においては、これらの限界の影響が考慮されていなかった。本研究では、上記の限界を考慮に入れた理論を構築する。

また自由落下による衝撃破壊試験を実施し、上記(1)の理論の有効性を検証する。

(2) エネルギー解放率測定法の開発： 高速進展き裂が分岐を繰り返す多重分岐き裂においては、そのエネルギー解放率を測定する方法が確立されていない。本研究は、いくつかの光学的方法を検討し、多重分岐き裂のエネルギー解放率を測定する方法を確立する。

(3) 多重分岐き裂で発生する破砕片の質量分布： 平板試験片に一樣応力を負荷し、高速進展き裂の多重分岐を発生させ、破砕片の質量分布を測定する。また、分岐角を決めている力学的機構を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 測定限界を考慮した理論の構築と検証： べき乗則に従う質量分布を人工的に作成し、それを元に、実験装置の大きさと測定精度の限界を考慮した理論を構築する。また高さ 17m からガラスと石膏の円盤試験片を落下させ、その破砕片の累積質量分布を測定する。その結果に上記(1)の理論を適用し、その妥当性を検証する。

(2) エネルギー解放率測定法の開発： COD法、ホログラフィ二重露光法、フィゾー型光干渉法、コースティック法の四種類の光学的方法を分岐き裂に適用し、多重分岐き裂のエネルギー解放率を測定する方法を確立する。

(3) 長さ 600mm、幅 100mm の大型平板試験片に一樣引張応力を負荷し、多重分岐き裂を発生させる。生じた破砕片の累積質量分布を測定し、多重分岐とべき乗則の関係を明らかにする。また、コースティック法を用い、分岐き裂先端の応力場を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 測定限界を考慮した理論の構築と検証

序論： 脆性材料が衝撃荷重によって破壊するとき、その破砕片の質量分布にはべき乗則が現れることが知られている。しかし、べき乗則成立の力学的機構はまだ明らかになっていない。

実験的研究においては、破砕片質量分布を直接測定することは測定精度が悪いことから、累積質量分布を測定し、そこから質量分布を求める方法が用いられている。

破砕片の累積質量分布は、以下の式によって定義される。

$$N_S(m) = \frac{1}{m} \int_0^m n(m') dm' \quad (1)$$

$$N_M(m) = \frac{1}{m} \int_m^\infty n(m') dm' \quad (2)$$

ここで、 $n(m')$ は破砕片の質量分布である。

破碎片質量分布がべき乗則

$$n(m) = am^b, \quad (3)$$

に従うとすると、式(2)と(3)から、累積質量分布 $N_S(m)$, $N_M(m)$ がべき関数となり、質量分布と同じ指数 b を持つことがわかる。したがって、累積質量分布 $N_S(m)$, $N_M(m)$ を測定することによって、質量分布の指数 b を知ることができる。このことから、質量分布に代わって累積質量分布が測定されてきた。

しかし、累積質量分布の測定においては、二つの測定限界が考慮されなければならない。一つは測定装置の限界のために、それ以上小さな質量は測定できないという測定の下限である。もう一つは実験装置の大きさに限界があり、それ以上大きな破碎片は生製できないという上限である。Oddershade 等は、このような測定上の限界の問題を初めて指摘したが、その後、累積質量分布の振る舞いとの関係に関する研究はなされてこなかった。

本研究では、実験における測定限界の影響を取り込んだ累積質量分布の理論式を構築し、それを実験的に検証した。

測定限界の理論： 実験において測定できる質量には下限 m_S が、また、生成できる破碎片質量には上限 m_M が存在する。したがって、実際の実験において式(1)と(2)を用いるとき、式(1), (2)は以下のように修正される必要がある。

$$N_S(m) = \frac{1}{m} \int_{m_S}^m n(m') dm' \quad (4)$$

$$N_M(m) = \frac{1}{m} \int_m^{m_M} n(m') dm' \quad (5)$$

質量分布 $n(m)$ が式(3)で与えられるなら、累積質量分布 $N_S(m)$ と $N_M(m)$ は以下の様になる。

$$N_S(m) = \frac{a}{b+1} m^b - \frac{a}{b+1} \frac{m_S^{b+1}}{m} \quad (6)$$

$$N_M(m) = -\frac{a}{b+1} m^b + \frac{a}{b+1} \frac{m_M^{b+1}}{m} \quad (7)$$

上式の右辺第2項が、実際の測定における下限と上限を表している。

実験方法： 図3は実験に使用された石膏試験片であり、直径は360mm、厚さが4.75mmである。この試験片を高さ17mからコンクリートに落下させ衝撃的に破壊した。

累積質量分布 $N_S(m)$, $N_M(m)$ は以下の手順で測定される。

- (1) 破碎片の質量を測定する。質量測定の下限は 10^{-7} kg である。
- (2) 全ての破碎片に軽い方から番号をつけ、離席質量分布 $N_S(m)$, $N_M(m)$ を求める。

実験結果： 図4は破壊された石膏試験片の破碎片の累積質量分布 $N_S(m)$ を示している。青丸は、実験で測定された $N_S(m)$ を示している。また、赤線は $b=-1.35$ を仮定して式(6)から計算された $N_S(m)$ である。両者は、破碎片質量が 10^{-6} kg より大きい領域において、互いに一致

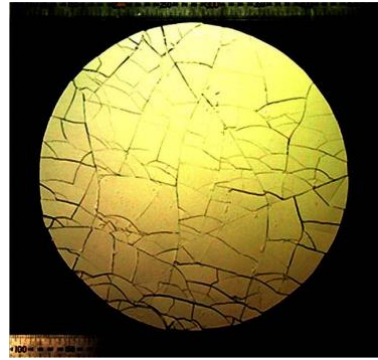


Fig.3 Gypsum specimen after impact fracture due to free fall from 17m in height.

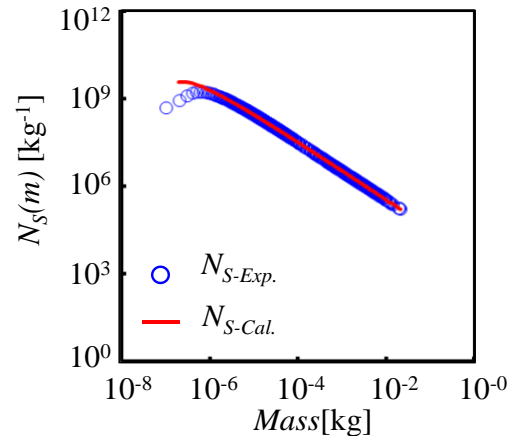


Fig.4 Cumulative mass distribution $N_S(m)$ of a gypsum specimen.

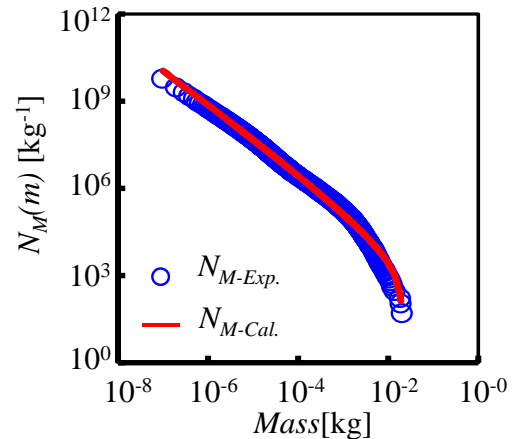


Fig.5 Cumulative mass distribution $N_M(m)$ of a gypsum specimen.

している。

図5は図4と同じ試験片の累積質量分布 $N_M(m)$ を示したものである。青丸は実験結果であり、赤線は $b=-1.15$ として式(7)から計算された値である。両者は互いによく一致している。また理論式は、実験結果の中に現れている折れ曲りを、よく表している。

結論： 実験における測定限界の影響を取り込んだ累積質量分布の理論式を構築した。

円盤型石膏試験片の落下破壊実験の結果、理論式は実験結果に現れる折れ曲りを良く表現できることが明らかになった。

参考文献

- (1) Murakami, Nishikita, Miyakawa and Suzuki, *The 10th Asia-Pacific Conf. on Fracture and Strength*, JSME, No.16-104, (2016), 495-496.
- (2) Klacka, J., *Earth, Moon and Planet*, **56**, (1992), 47-52.
- (3) Ishii and Matsushita, *J. Phys. Soc. Japan*, **61**, (1992), 3474-3477.
- (4) Oddersshade et al., *Phys. Rev. Lett.*, **71**, (1993), 3107-3110.

(2) エネルギー解放率測定法の開発

概要： 衝撃破壊において生成される破砕片の質量分布にはべき乗則が存在することが知られている。しかし、べき乗則の力学的条件は明らかになっていない。高速多重分岐き裂のエネルギー解放率を測定することは、べき乗則が成立する範囲を特定する上で重要な課題である。しかし現象の複雑さから、多重分岐き裂のエネルギー解放率を測定できる方法は存在しなかった。

本研究では、COD法、ホログラフィ二重露光法、フィゾー型干渉法、コースティック法を分岐き裂や高速進展き裂に適用し、その可能性を検討した。その結果、コースティック法と I 曲線理論を組み合わせることが、最も現実的な方法であることを見出した。

種々の光学的方法の検討： 本研究では以下に示す4つの光学的方法を検討した。

COD法： 分岐き裂のき裂開口変位(COD)を亀裂に沿って測定する方法である(図6)。最も測定精度が高いが、測定が煩雑である。

ホログラフィ二重露光法： COD法と同様に測定精度が高いが、手法が煩雑である。

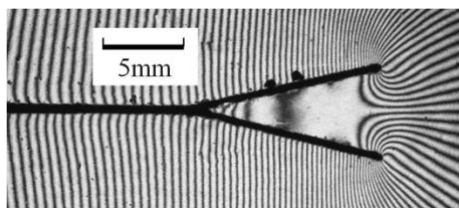


Fig. 6 COD measurement by Moire interferometry.

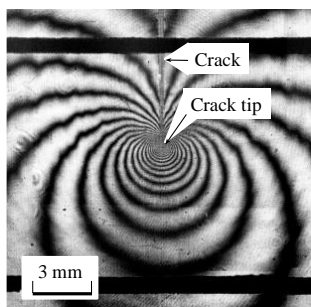


Fig. 7 Crack tip stress field (Double exposure holography). $v = 541$ m/s.

フィゾー型干渉法： 上記の二つの方法よりも精度が劣るが、高速度ホログラフィ顕微鏡法を用いた COD 法との同時測定が可能である。

コースティック法： 他の方法と比べて測定精度は劣るが、光学系が単純であり、最も簡単に測定できる。

上記の方法で撮影されたき裂先端応力場の例を図6,7に示す。

コースティック法による測定： 試験片には透明 PMMA 平板を用いた。大きさは、横幅 602 mm, 縦幅 100 mm, 厚さ 3 mm であり、横幅方向に一樣引張応力を負荷する。き裂は分岐を繰り返しながら縦幅 100 mm を進展する。

エネルギー解放率の測定には、コースティック法を用いる。コースティック法により各枝き裂の動的応力拡大係数 $K_I(v)$ を測定し、線形破壊力学を用いて枝き裂のエネルギー解放率を求める。各枝き裂のエネルギー解放率を合計し、分岐き裂全体のエネルギー解放率 G_{Total} を求める。

Fig. 8 に、撮影された多重分岐き裂の一例を示す。Fig. 8 は、き裂進展中に撮影されたコースティック像と破壊後の試験片の写真の合成写真である。き裂は下方に向かって進展しており、き裂速度は 734m/s である。コースティック像が撮影された瞬間には、12 個のき裂が同時に進展していた。

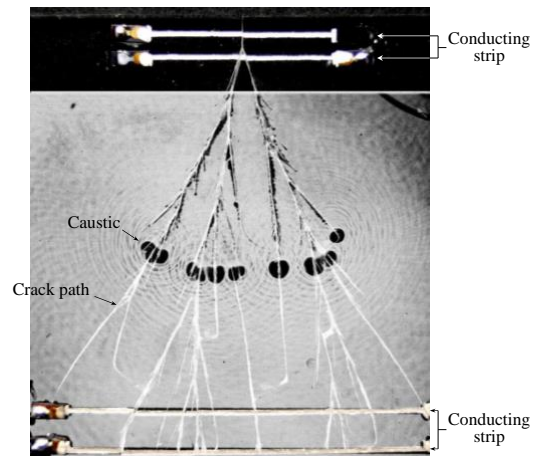


Fig. 8 Caustics and crack path of multiple branched crack in PMMA. Crack speed is 734 m/s.

Fig. 9 は多重分岐き裂のき裂先端位置と時間の関係を示している。この図から多重分岐を起こしているき裂の進展速度は、一定であることがわかる。この事実は、き裂分岐の I 理論の考えと一致している。

Fig. 10 は、コースティック像撮影時に進展していたき裂の数 N を示している。横軸は、試験片上端から測定したき裂先端位置 x である。き裂が進展するにつれてき裂数は増加し、 $x = 60\text{mm}$ において約 10 本に達する。しかし $x > 60\text{mm}$ の領域では、き裂数の増加は小さい。

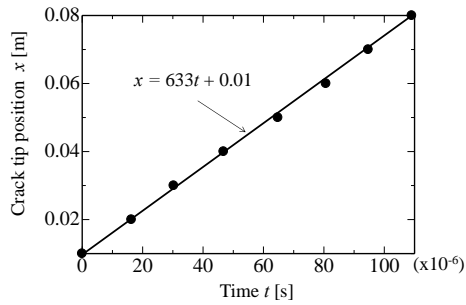


Fig. 9 Crack speed of multiple bifurcating crack.

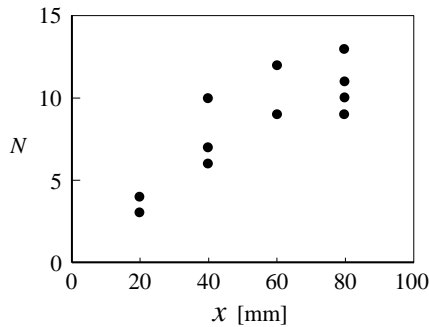


Fig. 10 The number of propagating cracks.

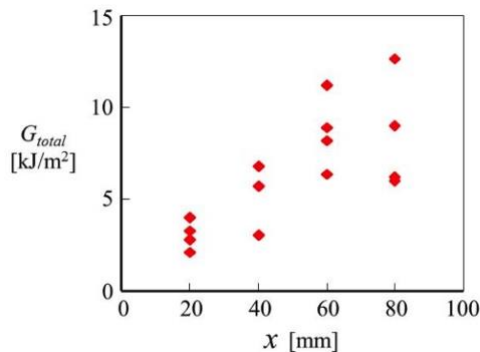


Fig. 11 Energy release rate of multiple bifurcating crack.

Fig. 11 は、き裂の全エネルギー解放率 G_{Total} を示している。エネルギー解放率は、き裂進展に伴って増加し、 $x = 60$ mm において約 8 kJ/m² に達している。

結論： 高速多重分岐き裂のエネルギー解放率を測定するために、種々の光学的方法を検討した。その結果、分岐の I 曲線理論とコースティック法を組み合わせる方法が最も実用出来であることが判明した。

参考文献

- (1) Suzuki, S., Yusof, M.A.B. and Miyashita, T., Measurement of Opening Displacement and Stress Intensity Factor of Two Branches of Bifurcated Notch by Moiré Interferometry, *Materials Today Proceedings*, (2018), (to be published.)
- (2) 鈴木新一, 沼田喜弥, 中出貴裕, ホログラフィ二重露光法とフィゾー型干渉法による高速進展き裂先端応力場の同時測定,

実験力学, 17-3, (2017), 250-257.

- (3) Suzuki, S, Maeda, T., Nakade, T. and Numata, Y., On Application of Caustic Method to Measure Stress Intensity Factor of Multiply Branching Crack, *12th Int. Symp. on Advanced Science and Tech. in Exp. Mech.*, (2017)
- (4) 鈴木新一, 高木翼, コースティック法を用いた高速多重分岐き裂のエネルギー解放率測定, *M&M2017 材料力学カンファレンス講演論文集*, (2017), 日本機械学会, No. 17-5, 94-95.

(3) 一様引張応力下の高速多重分岐き裂の発生と破砕片質量分布

幅 600mm、高さ 100mm の大形試験片に破壊応力の約 50% の一様引張応力を負荷し、高速進展き裂の多重分岐を発生させた(Fig.12)。エネルギー解放率測定には、コースティック法を用いている。破砕片の質量分布にはべき乗則が成立している事が確認されている。

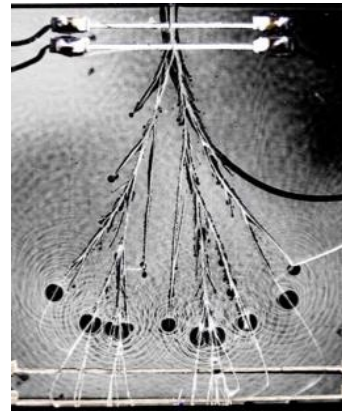


Fig.12 Multiple bifurcation of fast propagating cracks in PMMA plate specimen under

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

- (1) Shinichi SUZUKI, Mohd Azrin Bin YUSOF, Tomotaka MIYASHITA, Measurement of Opening Displacement and Stress Intensity Factor of Two Branches of Bifurcated Notch by Moiré Interferometry, *Materials Today Proceedings*, (2018), (to be published.)
- (2) 鈴木新一, 沼田喜弥, 中出貴裕, ホログラフィ二重露光法とフィゾー型干渉法による高速進展き裂先端応力場の同時測定, *実験力学*, 17-3, (2017), 250-257.
- (3) Shinichi SUZUKI, Yusuke IWASAKI, Yasunobu SHIMIZU and Mohd Azrin Bin YUSOF, Static experiment on rapid crack bifurcation with Y-shaped and parallel notches, *Mechanical Engineering Journal*, 3-6, (2016), DOI: 10.1299/mej.16-00541.

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) 鈴木新一, 高速多重分岐き裂の応力拡大係数測定に関する検討, 日本実験力学会分科会合同ワークショップ, (2017).
- (2) 鈴木新一, 米山聡, 山本大樹, 高速度ビデオカメラを用いた PMMA 中進展き裂の速度遷移現象の撮影, 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017, (2017), 9-4.
- (3) Shinichi SUZUKI, Takanobu MAEDA, Takahiro NAKADE and Yoshiya NUMATA, On Application of Caustic Method to Measure Stress Intensity Factor of Multiply Branching Crack, *The 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 1-4 November, 2017, Kanazawa, Japan*, JSEM, (2017), 123, 1-4.
- (4) 鈴木新一, 高木翼, コースティック法を用いた高速多重分岐き裂のエネルギー解放率測定, *M&M2017 材料力学カンファレンス講演論文集*, (2017), 日本機械学会, No. 17-5, 94-95.
- (5) Shinichi SUZUKI, Mohd Azrin Bin YUSOF, Tomotaka MIYASHITA, Measurement of Opening Displacement and Stress Intensity Factor of Two Branches of Bifurcated Notches by Moire Interferometry, *The 34th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics (University of Trieste, Italy)*, 2017.
- (6) 鈴木新一, 沼田喜弥, 中出貴裕, 二種類の干渉法による高速進展き裂先端応力場の測定, 日本実験力学会 2017 年度年次講演会講演論文集, (2017), 117-118.
- (7) 沼田喜弥, 鈴木新一, ホログラフィ 2 重露光法による高速進展き裂先端応力場の測定, 日本実験力学会講演論文集分科会合同ワークショップ 2016, 日本実験力学会, (2016), 28-31.
- (8) 鈴木新一, 高速度ホログラフィ法のデジタル化に関する可能性と困難, 日本実験力学会講演論文集分科会合同ワークショップ 2016, 日本実験力学会, (2016), 32-33.
- (9) Daiki YAMAMOTO, Ryoken WATANABE, Shuto AMAHATA, Satoru YONEYAMA and Shinichi SUZUKI, A Method to Measure Velocity Transition and Stress Intensity Factor of Propagating Cracks with High-speed Video Camera, *The 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (31st ICHIP, Osaka, Japan)*, Organizing Committee for 31st International Congress on High Speed Imaging and Photonics, (2017), 642-647.
- (10) Shinichi SUZUKI, Kenichi SAKAUE and Yoshiya NUMATA, Discussion on Holography Techniques Applied in Dynamic Fracture Research, *The 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (31st ICHIP, Osaka, Japan)*, Organizing Committee for 31st International Congress on High Speed Imaging and Photonics, (2017), 112-113,
- (11) Tomoya MURAKAMI, Masashi NISHIKITA, Yutaka MIYAKAWA and Shinichi SUZUKI, Effect of Measurement Limit on Cumulative Mass Distribution of Fragments Generated by Impact Fracture, *The 10th Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength (APCFS2016, Toyama, Japan)*, JSME, No. 16-104, (2016), 495-496.
- (12) 前田生進, 沼田喜弥, 中出貴裕, 鈴木新一, コースティック法による多重分岐き裂の応力拡大係数測定, 日本実験力学会後援論文集, No.15, (2015), 145-146.
- (13) Kenichi SAKAUE, Susumu OHKI, and Shinichi SUZUKI, Discussion on Energy allocation problem into Branch Cracks by using Stationary Bifurcated Crack and Digital Image Correlation, *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, Abstract Book of ATEM`15*, (2015), 25.
- (14) Daiki YAMAMOTO, Shinichi SAKA, Takeshi KOBAYASHI, and Shinichi SUZUKI, Measurement of Molecular Weight Dependence of Dynamic Fracture Toughness of PMMA Against Low Speed Propagating Cracks, *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, Abstract Book of ATEM`15*, (2015), 106.
- (15) Mohd Azrin bin YUSOF, Yusuke IWASAKI, Yasunobu SHIMIZU, and Shinichi SUZUKI, Static Experiment on Rapid Crack Bifurcation with Y-shaped and Parallel Notches, *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015, Abstract Book of ATEM`15*, (2015), 107.

〔その他〕

解説 (計 2 件)

- (1) 鈴木新一, 衝撃破壊の実験的研究における光計測法の現状と課題, *実験力学*, 17-2, (2017), 91-96.
- (2) 鈴木新一, シャドグラフ法とコースティック法, *実験力学*, 18-1, (2018).

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
鈴木新一 (SUZUKI, Shinichi)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・シニア研究員
研究者番号: 60135415