

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06545

研究課題名（和文）高時間分解能画像計測と高次PDS-FEMを用いたき裂分岐についての検討

研究課題名（英文）A study on crack bifurcation mechanism by using image measurement with high temporal and spacial resolutions, and high-order PDS-FEM

研究代表者

沖中 知雄 (Okinaka, Tomoo)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：90298985

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：き裂分岐のメカニズムを実験と数値解析を用いて検討することを目的として研究を行った。実験では高時間分解能・高空間解像度な画像計測を用いてき裂の分岐挙動の画像計測を行った。進展するき裂は試験後の供試体で確認できる分岐点より前に複数の非貫通き裂に分岐し、発生したき裂は互いに平行に進展しながら再分岐と合流を繰り返した後に互いに遠ざかる方向に進展方向を変え、分岐き裂に成長する挙動が明らかになった。またき裂分岐直前のき裂進展速度の変動は確認された部分き裂の分岐と合流に起因することが明らかになった。数値解析では、高次PDS-FEM法を動的問題に拡張し、き裂の進展を再現することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

進展するき裂の分岐挙動は連続体の破壊現象を検討する上で重要な問題である。地震の原因となる断層の破壊の検討や、災害時の社会的資本の健全性評価に繋がる基礎的研究と位置付けることができ、社会的意義の大きな研究である。本研究ではき裂分岐挙動を高時間分解能、高空間解像度な連続画像として画像計測し、き裂分岐に至るき裂先端部の挙動を明らかにすることができた。これによりき裂分岐現象の解明に大きく寄与することができた。また高次PDS-FEM法を動的問題に適用してき裂進展問題へ適用することに成功したことは、数値解析を用いた社会資本の健全性評価に大きく寄与することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The mechanism of crack branching is studied experimentally and numerically in this work. The image measurement with high temporal and high spatial resolutions is applied to the crack branching behavior. It is observed that the single propagation crack bifurcates into multiple partial cracks and they repeats re-branching and merging while propagating parallel to each other, before the bifurcation point which is confirmed in the specimen after the experiment. They change the propagating directions to those of moving away from each other, and grow into the branching cracks. It's also concluded that the fluctuation of the crack propagation speed before the bifurcation is caused due to the re-branching and merging behavior of partial cracks. As the numerical simulation, high-order PDS-FEM is applied to the dynamic simulation and the crack propagation is successfully simulated.

研究分野：材料力学

キーワード：き裂分岐 画像計測 PDS-FEM

### 1. 研究開始当初の背景

連続体中を進展するき裂では進展速度が十分な速度に達すると分岐が発生することが知られている。き裂の分岐現象は連続体の破壊を考える上で重要な問題であり、既に多くの理論的、実験的な研究がなされている。

高速かつ面的に進行するき裂分岐の実験的検討には、時間分解能の高い高速カメラを用いた画像計測が適している。既往の研究でも時間分解能の高い画像計測を適用した例は多く、Dally 等、Ramulu 等は光弾性手法と高速カメラを組み合わせ分岐するき裂の応力拡大係数を検討し、また Ravi-Chandar 等はコースティック法と高速カメラの組み合わせにより動的応力拡大係数やき裂進展速度の検討を行っている。また鈴木等は分岐前後のき裂のホログラム画像を撮影することにより、き裂先端部の COD の精密な計測を行い、分岐前後でエネルギー解放率が連続であることを示している。

これらの既往の研究の多くは引張荷重を受ける薄肉供試体中のき裂分岐を対象とし、分岐を 2 次元問題として取り扱っている。その一方で、き裂の 3 次元挙動が分岐に与える影響が Ravi-Chandar 等や Sharon 等によって指摘されている。また鈴木等は分岐直後のき裂を供試体両面からホログラム撮影し、分岐直後のき裂が表面き裂であることを指摘している。このように、き裂の分岐現象にき裂の 3 次元挙動が与える影響が大きい可能性が指摘されている。特に Sharon はインピーダンスを用いてき裂進展速度を計測し、き裂伝播速度が飽和した後、微小分岐の発生に伴ってき裂進展速度が変動することを報告している。

しかしながら、分岐過程における微小分岐の発生から分岐き裂の成長へと繋がるき裂の 3 次元挙動の詳細が十分に解明されたとは言い難い。これは高速カメラを用いた既往の研究で使用されたカメラの撮影速度が毎秒数万枚に留まり、分岐過程の詳細な検討には時間分解能が十分でないためである。また時間分解能の高い計測手法を用いた既往の研究の多くはき裂像を記録しない計測手法を採用しており、き裂像を記録する計測でも記録枚数が数枚に留まるためである。分岐前後のき裂の挙動の把握は数値解析手法の開発の観点からも重要である。3 次元動的数値解析によるき裂分岐の再現は、き裂分岐のメカニズムやき裂周りのエネルギーを検討するための有効な手法であるが、動的数値解析の解析精度を検証するためには分岐前後のき裂先端部の詳細な挙動の把握や、数値解析結果と比較可能な形でき裂先端部近傍の応力分布の計測が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では時間分解能の高い超高速ビデオカメラを用いて、分岐前後のき裂先端部の挙動を時間分解能と空間分解能が高く記録枚数の多い連続画像として画像計測することを試みる。き裂の分岐挙動を供試体横方向と斜め下方向の 2 方向から画像計測し、き裂進展速度飽和後の微小分岐の発生から分岐き裂の成長に至る過程でのき裂の挙動を詳細に検討すると共に、数値解析の精度検証に利用可能な実験結果の取得を試みる。また Sharon 等<sup>13)</sup>により報告されたき裂進展速度の変動を、微小分岐後のき裂の挙動と関連付けて検証することを試みる。

また、高次 PDS-FEM 法を用いた動的き裂進展解析により、き裂分岐過程を再現できる数値解析手法の開発を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究で使用する供試体として、透明脆性材料であるエポキシ樹脂を用いて初期き裂をもつ矩形供試体を作成した。使用したエポキシ樹脂の物性を Table 1 に、供試体寸法を Fig. 1 に、作成された供試体を Fig. 2 に示す。横方向からの画像計測に使用する供試体は厚さ 1mm、斜め下方向からの画像計測実験では供試体厚さを 2mm とし、初期き裂長さは共に 10mm とした。ピンを介して引張荷重を載荷することにより、初期き裂からき裂を進展させた。また画像計測の際に撮影位置を明確にする目的で、作成した供試体には左端部から 30mm、40mm、50mm の地点で縦線を記している。

供試体横方向からの画像計測のための実験装置の概要を Fig. 3 に示す。高速撮影のための光源として波長 532nm

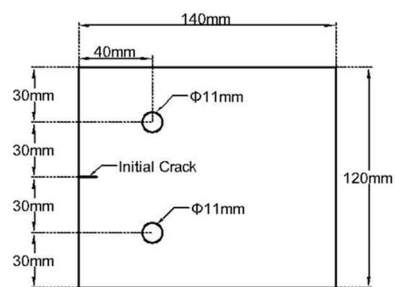


Fig. 1 Geometry of the specimen



Fig. 2 Rectangle specimen

Table 1 Material property of epoxy resin

Young Modules	3.84 [GPa]
Poisson ratio	0.3
Density	1250 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

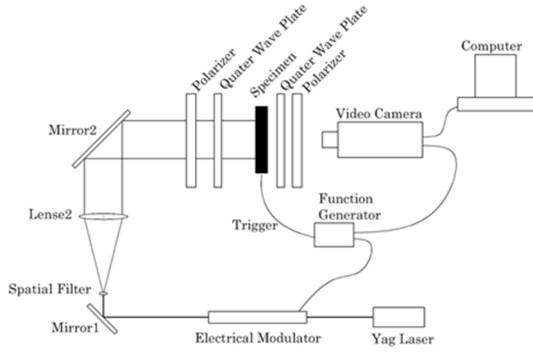


Fig. 3 Light path diagram for horizontal image analysis

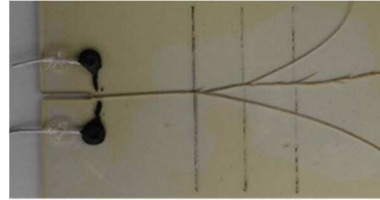


Fig. 5 Fractured specimen (Fracture load: 0.7kN)

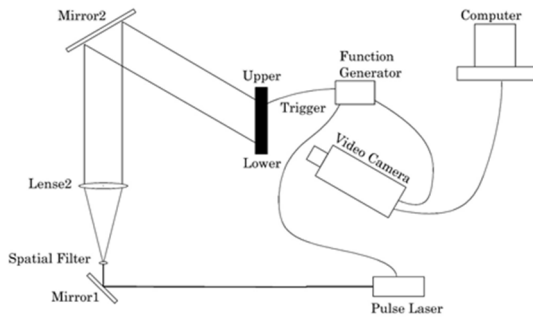


Fig. 4 Light path diagram for inclined image analysis

の Yag レーザーを使用した。スペイシャルフィルターとコリメータレンズを用いて形成した平行光を引張載荷装置に固定された透明供試体に照射し、透過画像を超高速度ビデオカメラで撮影する。本研究では超高速度ビデオカメラとして、解像度  $312 \times 446$  画素で毎秒 2,000 万枚まで撮影可能な近畿大学で開発された超高速度ビデオカメラの試作機<sup>15)</sup>を使用した。使用したカメラの撮像素子は画素周辺記録型撮像素子である。撮影中は画素毎の撮影データを各画素内に保存して撮影終了後に読み出す方式を採用しており、光源からの強い光が撮影終了後もカメラに入射し続けると画素内に保存されている撮影画像が損なわれる。これを防ぐため光路上にモジュレーターを設置し、カメラによる撮影タイミングとレーザー照射のタイミングの同期を図った。供試体に導電性塗料による遮断トリガーを設置し、トリガーの切断信号を契機としてシグナルジェネレーターを起動してカメラとモジュレーターに同期信号を送信する。

また光学系に偏光板と  $1/4$  波長板を含めることにより、供試体内部の応力分布を光弾性縞として可視化した。これは本研究で得られた結果を 3 次元動的数値解析の精度検証に使用するためである。数値解析により得られた応力分布から再現した光弾性縞を実験で計測された光弾性縞と比較することにより、応力分布の精度を検証することを目的としているが、本論文の中では光弾性縞についての言及は行わない。

斜め方向からのき裂分岐計測の実験装置の概要を Fig. 4 に示す。光源として波長 520nm のピコ秒パルスレーザーを使用し、形成された平行光を供試体の斜め上から照射して光軸上に配置した超高速度ビデオカメラで供試体透過画像を撮影した。光軸の角度は水平からの仰角を 22 度とした。横方向からの撮影と同様に、供試体に塗布した導電性塗料が切断されたタイミングでレーザーとカメラに同期信号を送り、撮影中のみレーザーが照射されるように設定した。

斜め方向からのき裂分岐計測の実験装置の概要を Fig. 4 に示す。光源として波長 520nm のピコ秒パルスレーザーを使用し、形成された平行光を供試体の斜め上から照射して光軸上に配置した超高速度ビデオカメラで供試体透過画像を撮影した。光軸の角度は水平からの仰角を 22 度とした。横方向からの撮影と同様に、供試体に塗布した導電性塗料が切断されたタイミングでレーザーとカメラに同期信号を送り、撮影中のみレーザーが照射されるように設定した。

#### 4. 研究成果

0.7kN で破断した供試体を Fig. 5 に示す。初期き裂から進展を開始したき裂は供試体左端部から 30mm で分岐した。上方向に分岐したき裂はすぐに進展を停止したが、下方向に進展したき裂は 31mm で再度上下に 2 分岐した。下方向に進展したき裂はそのまま進展を続け、供試体下端に達した。上方向に進展したき裂は 40mm で再度分岐し、上下方向に分岐したき裂は各々供試体上端部と右端部に達するまで進展を続けた。

破断後の供試体から確認できる分岐点を含む、左端部から 25.3mm~32.8mm の 7.5mm 幅の領域におけるき裂進展挙動を超高速度ビデオカメラにより画像計測した結果を Fig. 6 に示す。時間分解能  $0.2 \mu\text{s}$ 、空間分解能  $0.017\text{mm}/\text{pixel}$  で撮影された 106 枚の画像から、撮影開始後  $0.6 \mu\text{s}$  以降のき裂進展挙動を  $0.4 \mu\text{s}$  毎に 30 枚の画像として示している。図中では  $320 \times 446$  画素で撮影された画像から  $71 \times 446$  画素を抜き出している。図中の縦線は供試体左端部から 30mm 地点でのマークであり、またき裂先端部周辺に光弾性縞が発生している。

右方向に進展するき裂は  $2.2 \mu\text{s}$  でき裂 A, B, C に 3 分岐する。き裂 A, B, C は互いに約  $0.035\text{mm}$  の間隔をもって平行に進展し、 $4.2 \mu\text{s}$  で合流してき裂 D となる。合流後も進展を続けたき裂は  $6.2 \mu\text{s}$  でき裂 E, F に 2 分岐する。き裂 E と F は  $0.07\text{mm}$  の間隔で平行に進展した後、左端部から 30mm の線上付近でき裂進展方向を変え、き裂 E は上方向へ、き裂 F は下方向への

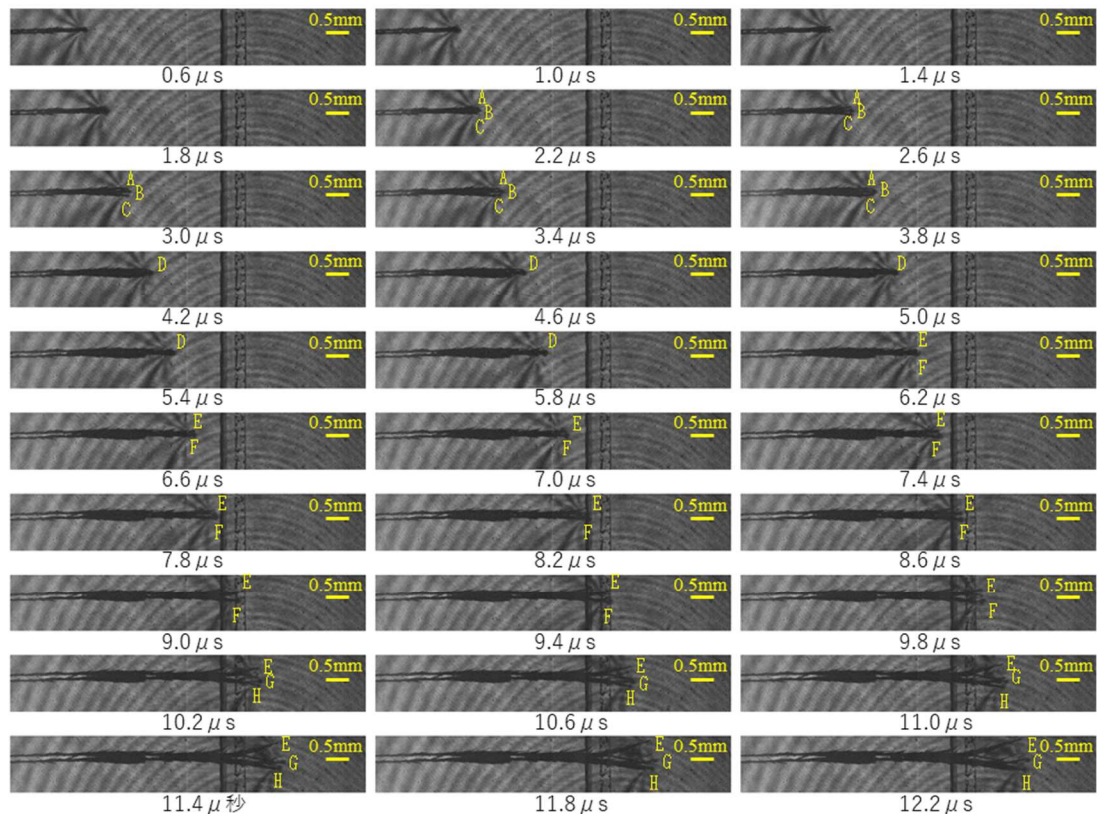


Fig. 6 Images of bifurcation captured by ultra high speed camera (Fracture load:0.7kN)

分岐き裂へと成長する. 分岐後き裂 E は進展を停止するが, き裂 F は  $10.2 \mu\text{s}$  で再度き裂 G と H に 2 分岐し, 供試体端部に至るまで進展を続ける.

このことから, 破断後の供試体で確認できる分岐点より前に供試体中では微小分岐が発生し, 分岐したき裂は互いに平行に進んだのちに徐々に進行方向を変化させて分岐き裂へと成長する挙動が明らかとなった. また Fig. 6 の  $10 \mu\text{s}$  以降の画像ではき裂 D から下方方向に分岐したき裂がき裂 E と交差しており, 一方もしくは双方のき裂が表面き裂として進展していることがわかる.

き裂の 3 次元挙動をより明確に観察する目的で, 斜め下方方向から分岐き裂の挙動を画像計測することを試みた.  $1.15\text{kN}$  で破断した供試体を Fig. 7 に示す. 初期き裂から進展したき裂は供試体左端部から  $40\text{mm}$  で上下に 2 分岐した. 上方方向に分岐したき裂は進展を停止したが, 下方方向に進展したき裂は  $43\text{mm}$  で再度上下に 2 分岐し, 分岐したき裂はさらに分岐しながら供試体端部まで進展を続けた.

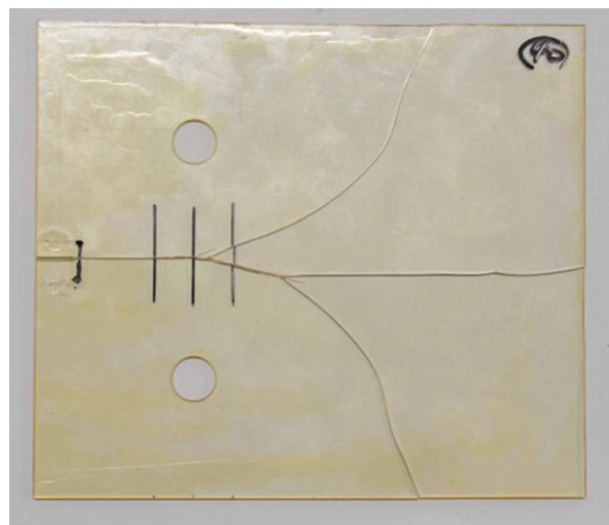


Fig. 7 Fractured specimen (Fracture load: 1.15kN)

供試体左端部から  $27.5\text{mm} \sim 49\text{mm}$  の領域におけるき裂進展挙動を超高速ビデオカメラにより画像計測した結果を Fig. 8 に示す. 時間分解能  $0.2 \mu\text{s}/\text{frame}$ , 空間分解能  $0.058\text{mm}/\text{pixel}$  で撮影された 106 枚の画像のうち, 図中には撮影開始後  $1.8 \mu\text{s}$  から  $21.0 \mu\text{s}$  までの画像を  $0.6 \mu\text{s}$  毎に 33 枚示している. 図中では  $61 \times 446$  画素部分を抜き出して示している. 図中の左の縦線は供試体  $30\text{mm}$ , 右の縦線は  $40\text{mm}$  地点でのマークであり, カメラの撮影角度は水平面からの仰角が  $22^\circ$  である.

$1.8 \mu\text{s}$  で図中に A で示すき裂の先端部は直線であり, き裂先端部の形状は 2 次元の面内き裂とみなせる形状を保っている. その後き裂は供試体表面近傍で小分岐き裂を発生させながら進展を続けるが, 徐々に右方向に進展するき裂の太さが細くなる.  $8.4 \mu\text{s}$  の画像に B で示したき裂先端部は幅約  $1.1\text{mm}$  であり, 供試体厚さ  $2\text{mm}$  に達していない. このことから, 先行しているき裂は供試体を貫通していない部分き裂である. さらに  $11.4 \mu\text{s}$  の画像中に示すき裂先端部 C は二股に分かれており, 供試体表面近傍のき裂両端部が先行して進展し, 供試体中央付近ではき

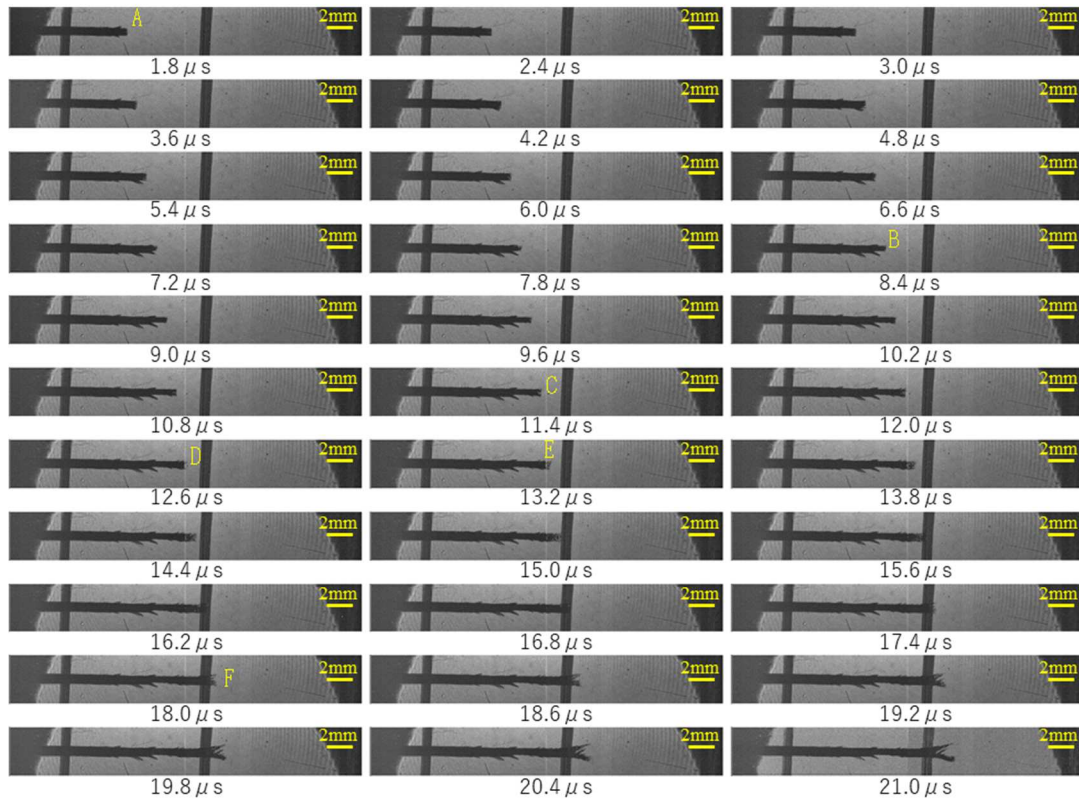


Fig. 8 3 dimensional behavior of bifurcating crack captured by inclined ultra high speed camera

裂が遅れて進展している。11.4  $\mu\text{s}$  以降ではき裂は供試体厚さ方向のき裂幅を回復し、12.6  $\mu\text{s}$  中に示すき裂先端部 D ではき裂幅は供試体厚さ 2mm と一致する。12.6  $\mu\text{s}$  以降でき裂先端部の厚さの減少は観測されないが、13.2  $\mu\text{s}$  に示すき裂先端位置 E で先端部近傍のき裂像に濃淡が生じ、その後の画像でも濃淡が続いている。破断後のき裂断面の観察により、き裂断面で凹凸が生じており、この影響がき裂先端像の濃淡として撮影されていることが分かった。き裂はその後も進展を続けるが、18.0  $\mu\text{s}$  で画像中に示すき裂先端部 F では中心から 2 つに分岐しており、2 本の部分き裂を形成している。その後 2 本の部分き裂は互いに遠ざかる方向へと進展方向を変えて進展を続けた。F は供試体左端部から 40mm の地点であり、破断後の供試体で確認された最初の分岐点と一致していることから、部分き裂が分岐き裂に成長していくことが確認された。

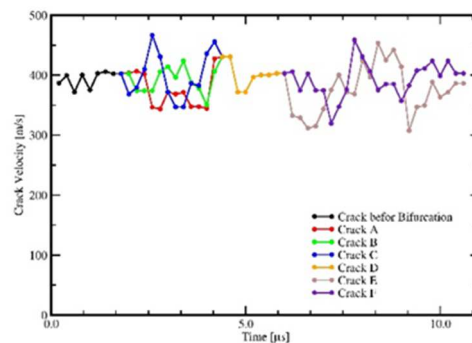


Fig. 9 Propagation velocity of branched cracks

また面内き裂挙動において微細な間隔を置いて進展する平行き裂が観察された。Fig. 11 の 11.4  $\mu\text{s}$  の画像で表面き裂に分岐して進展するき裂が確認されており、面内計測で観測された平行き裂は分岐した表面き裂であることがわかる。

Fig.6 に示された画像からき裂先端位置を読み取り、き裂進展速度を検討した結果を Fig.9 に示す。計測開始時に分岐前のき裂の進展速度は 400m/s で、供試体中のせん断波の伝播速度の約 40%で飽和している。2.2  $\mu\text{s}$  で微小分岐が発生すると、分岐したき裂 A, B, C は進展速度を大きく変動させながら進展を続ける。4.2  $\mu\text{s}$  でき裂 A, B, C がき裂 D として合流すると進展速度の変動は収束し、400m/s で安定する。6.2  $\mu\text{s}$  でき裂が再度分岐すると、分岐き裂 E, F の進展速度は再び変動するが、き裂の進展に伴って変動は小さくなり 400m/s 程度で安定する。このことから、Sharon 等<sup>13)</sup>によって報告された微小分岐後のき裂進展速度の変動は、分岐した部分き裂の進展速度の変動により生じていることが明らかになった。微小分岐によって発生した部分き裂の進展速度は大きく変動し、部分き裂が合流して単一のき裂に戻るか、もしくは分岐き裂として成長するに従ってき裂進展速度が安定する挙動が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 L.Quaranta, L.Maddegedara, T. Okinaka and M.Hori	4. 巻 65
2. 論文標題 Application of PDS-FEM to the Simulation of Dynamic Crack	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1289-1304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00466-020-01819-z	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 沖中知雄	4. 巻 20
2. 論文標題 高時間分解能画像計測を用いた分岐き裂挙動の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 実験力学論文集	6. 最初と最後の頁 38-44
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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tomoo Okinaka and Takeharu Etoh
2. 発表標題 Application of high time and spatial resolution image measurement on crack bifurcation
3. 学会等名 32nd International Congress on High-Speed Imaging and Photonics（国際学会）
4. 発表年 2019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
研究 分 担 者	Maddegedara L.  (Maddegedar Lalith)  (20426290)	東京大学・地震研究所・准教授        (12601)	

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
---------	---------