

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420016

研究課題名(和文)超高速撮影および高精度数値解析を駆使した破壊制御評価法に関する基礎研究

研究課題名(英文)Basic research for measurement of fracture control using ultra high speed observation and precise numerical analyses

研究代表者

藤本 岳洋 (Fujimoto, Takehiro)

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：60314514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：炭素工具鋼SK85、鋳鉄FC200を対象とした三点曲げ破壊実験と、その実験結果に基づいた数値解析を行った。き裂進展に伴い、塑性変形の発生が顕著化した場合、塑性変形に多くのエネルギーが消費され、破壊エネルギーの占める割合は相対的に小さくなる。このような状況ではより高精度の数値解析等を用いないと正確な破壊エネルギー算定が達成できないことが示された。FC200に対する衝突破壊実験・数値解析では、破断加工では動的き裂進展開始条件と入力エネルギー速度の制御が重要との示唆が得られた。

研究成果の概要(英文)：Experiments and numerical simulations are achieved for three point bending fracture of materials SK85 or FC200. In dynamic elastic visco-plastic fracture of SK85, many input energy are changed to visco-plastic works. Fracture is caused by a little energy. Exact measurements for fracture energy are required to control fracture condition. Experiments for dynamic fracture of FC200 are demonstrated under the condition for various striker-tip, striker material and striker velocities. Experimental results and numerical results show that the control of dynamic crack initiation and input energy rate into specimen are important for break processing.

研究分野：破壊力学

キーワード：切断加工 破壊力学 J積分 切り欠き径 荷重速度

1. 研究開始当初の背景

破壊力学の知見の多くが切断加工に適用しづらい原因のひとつとして、き裂問題の応力関数解析が平面ひずみ状態・平面応力状態といった二次元変形近似の下に為されてきたことが挙げられる。三次元変形状態下のき裂先端近傍変形場の応力関数解析は単純形状、巨視的引張荷重下のものにほぼ限られていた。また切断加工時の負荷は高速荷重であることが多いが、このような動的荷重下の複雑形状構造内の三次元的な破壊挙動は古典的な解析法では扱うことができない。

しかし、既に計算サーバーの飛躍的な性能向上により、三次元き裂問題の数値シミュレーションが十分可能となった。そのため、このような切断加工問題に対しては、数値シミュレーションを援用して最適な加工条件を探る取り組みがなされている。企業や研究機関の多くが、商用数値解析ソフトウェアを利用するが、これらのソフトウェアに組み込まれている破壊モデルは力学的な検証が完全に為されたものではなく、仮説に基づくものが多い。破壊モデルの妥当性の最終的な確認はソフトウェアの利用者に委ねられている。そのため、利用者は破壊モデルが自身の加工問題について妥当なモデルであるかどうか、その普遍性はどれぐらいのものかを自前で調べざるを得ず、商用数値解析ソフトウェアの利用は実用性において本末転倒の体をなす場合もある。これまで研究申請者が企業から受けた技術相談の多くでこのような問題が見受けられた。破壊に関する研究成果は、構造強度の担保だけでなく、切断加工等の条件選定にも有益なものとなるべきと考えられるが、破壊のメカニズムは決して単純なものではなく材料種や利用温度、負荷速度等に強く依存するため、各種の切断加工に対してシンプルかつ適用範囲の広い統一的な破壊モデルが容易に示されるとは考え難く、更なる研究が必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、常温域、比較的低速度（数百 $\mu\text{m/s}$ から数十 m/s ）の荷重下の破壊実験について、超高速カメラ等を用いたき裂進展挙動の観察を行い、各負荷速度下の破壊開始条件、き裂進展速度、き裂進展経路や破面粗さを調べる。さらに移動有限要素法を用いた数値解析を行い、動的 J 積分等の破壊力学パラメータを求め、破面粗さの制御は切断加工において重要事項であるため、粗さと相関性のある何らかのパラメータが見出されることには大きな意義がある。ここでは、「種々の破壊力学パラメータと破面形成の相関性」を精査し、破面粗さに評価に有効な指標を求めていく。

実験観察の実施 - 数値シミュレーションといった同様のアプローチをとることによって破壊力学パラメータを導出し、加工条件選定に有益な知見をもたらすことが具体的な切断加工問題においても可能となること

が更なる目標である。

3. 研究の方法

試験材料として炭素工具鋼 SK85 および鋳鉄 FC200 を選定した。SK85 のヤング率は $206[\text{GPa}]$ 、ポアソン比は 0.3 、密度は $7850[\text{kg/m}^3]$ である。SK85 の破壊挙動の一部では破面付近に塑性変形が認められた。本報では、高速変形を伴う SK85 の弾粘塑性関係を次式の Malvern 型の相当応力 σ 相当粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{\text{vp}}$ の関係にて表している。

$$\dot{\epsilon}^{\text{vp}} = 500 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} + 1 \right) \quad (1)$$

$$\sigma_f = 1.10 \times 10^9 \cdot (\dot{\epsilon}^{\text{p}})^{0.2693} \quad (2)$$

式中の静的流動応力 σ_f の単位は $[\text{Pa}]$ である。FC200 のヤング率は $70[\text{GPa}]$ 、ポアソン比は 0.27 、密度は $7040[\text{kg/m}^3]$ である。

SK85 製 3 点曲げ裂試験片の中央にはワイヤ径 $0.3, 0.5, 0.7\text{mm}$ の放電加工によって、幅の異なる予切り欠きを設定した(図 1 参照)。各試験片について準静的荷重下、衝撃荷重下の破壊・き裂進展実験を行い、切り欠き端からのき裂進展・破面形成の挙動を撮影することにより切断加工の基礎的知見を得た。

同実験条件・き裂進展挙動観察結果に基づいたき裂進展現象の移動有限要素解析によって、動的 J 積分、T* 積分等に基づく破壊抵抗、試験片内のエネルギーバランスの評価等を行った。数値解析においては平面ひずみ状態を仮定し、ニューマーク β 法を用いて時間積分を行っている。

移動有限要素法は、1. (高速)き裂進展に伴う試験片境界条件の変化を要素細分割によって厳密に再現、2. 要素分割更新に伴い変位・速度・加速度場や塑性ひずみ場等の情報を節点・要素毎にマッピング、3. き裂先端近傍の細要素分割群を維持し、き裂先端近傍応力特異場を高精度で評価、という特徴・長所を有した数値解析法である。移動有限要素法を用いることにより実験で観察した破壊挙動の不可視情報(応力場等)の評価を行った。

また、負荷様式が破壊挙動に与える影響を調べるため、ストライカー材料、先端形状、初期衝突速度を変えた衝突破壊実験を行い、ストライカー接触条件等がき裂進展挙動に与える影響を調べた。この実験では鋳鉄 FC200 製 3 点曲げ裂試験片を用いた。試験片の形状は図 1 に準じるが、この試験片の予き裂先端は、疲労成長により鋭利化している。ストライカー先端材料はそれぞれ、クロムモリブデン鋼 SCM440、アルミ合金 A2024、ナイロン樹脂 MC 製の 3 種類とした。き裂進展部、衝突部の推移を高速カメラにより撮影し、き裂進展挙動、衝突部のストライカー変位推移を計測した。この変位履歴を基に、数値シミュレーション内でストライカー・試験片衝突部の接触・非接触状態を判定しながら、き裂進展時の応力拡大係数の推移等を調べ、破壊の定常性・非定常性を論じた。

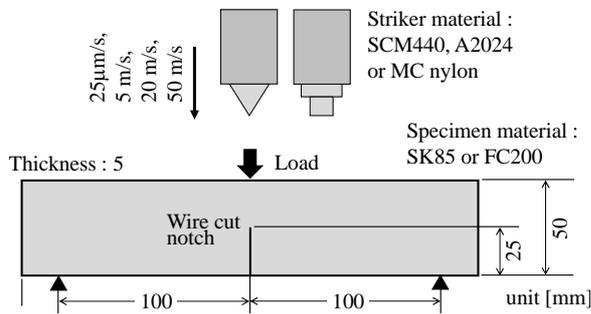


Fig.1 Specimen geometry

4. 研究成果

SK85 材を用いた準静的荷重下の破壊実験で得られた荷重 - 荷重点変位関係を図 2 に示す。予切り欠き径の違いに関わらず破壊荷重に大きな差異は生じないが荷重応答には非線形性が見られ、き裂先端近傍には顕著な塑性変形が認められた。破断部に顕著な永久変形が残留する事態は多くの破断加工において望ましくない結果である。そのため、予切り欠きを起点とした破断加工において準静的荷重作用は適切とは言い難い。

ワイヤ径 0.3mm の放電加工予切り欠きを有する試験片について、動的荷重作用下の破壊挙動を撮影した高速画像の一部を図 3 に示す。これらの画像から衝突点変位とき裂進展量を計測し、移動有限要素解析を行った。SK85 材を線形弾性材、式(1),(2)で表される弾粘塑性材としてシミュレートし、エネルギーバランスを評価した結果を図 4 に示す。いずれの材料構成関係においてもエネルギー収支を満たした結果が得られている。また、入力エネルギー E_i 中に占める破壊エネルギー E_f の割合は非常に少ない。変形エネルギーは塑

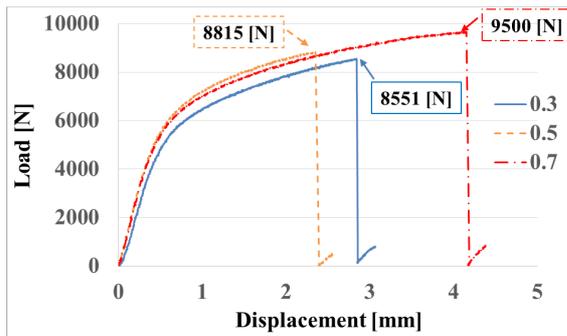


Fig.2 Quasi-static load history for SK85 specimens

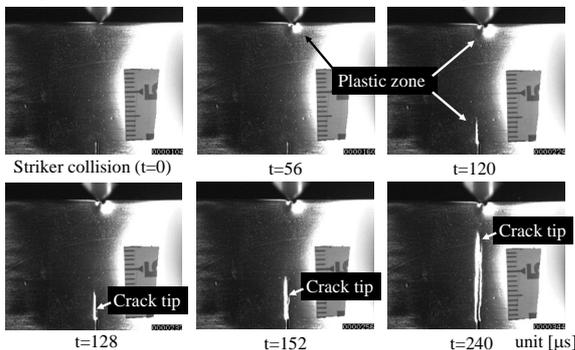
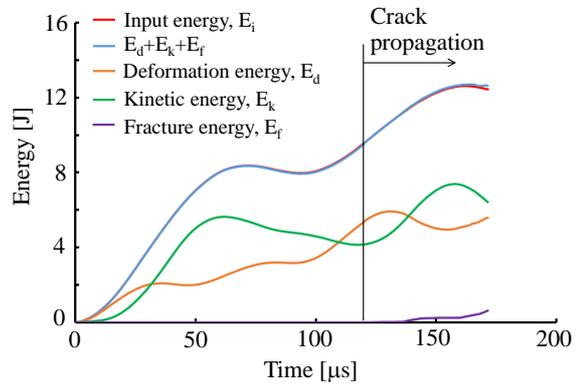
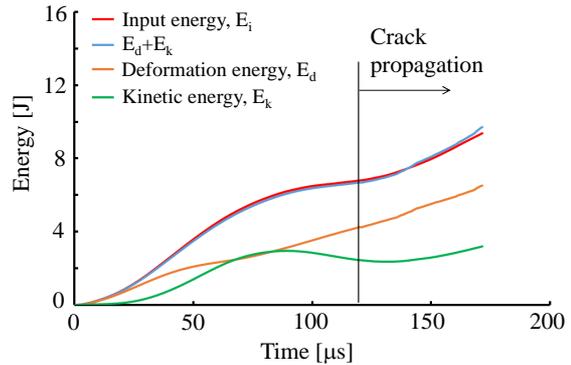


Fig.3 High speed image for fracture behavior in SK85 specimens



(a) Elastic analysis



(b) Elastic visco-plastic analysis for specimen A wire cut width = 0.3 [mm]

Fig.4 Energy balance for numerical simulations

性仕事になり得るため、塑性変形発生を極力避けた破断加工実現には入力エネルギーの制御が必要であるとともに正確な破壊エネルギー評価が必須である。

FC200 材を用いたストライカー材料等依存性に関する衝突破壊実験では、図 5 に示すように観察画像から衝突部のストライカー変位り歴の仔細 $\delta_x(y,t)$ を計測した。数値解析では試験片領域のみを要素分割・計算対象としており、この変位り歴を衝突境界に与えることで数値解析を行う。しかし、試験片全体の剛性が高いため、試験片・ストライカー間では接触状態が継続しない。各時間ステップにおいて衝突部の各節点力をモニタし、節点力が反転（上向きに作用）した際には、その初期衝突部節点位置の試験片・ストライカー間は接触状態から非接触状態に移行とみなした

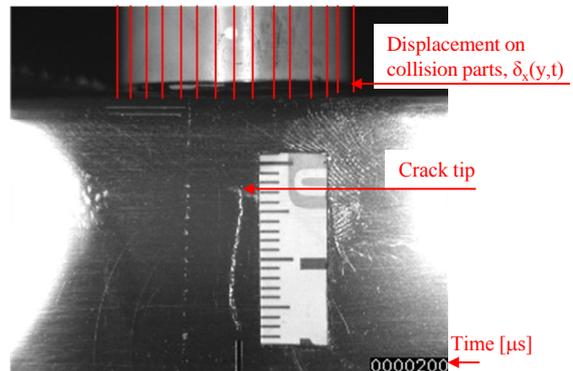
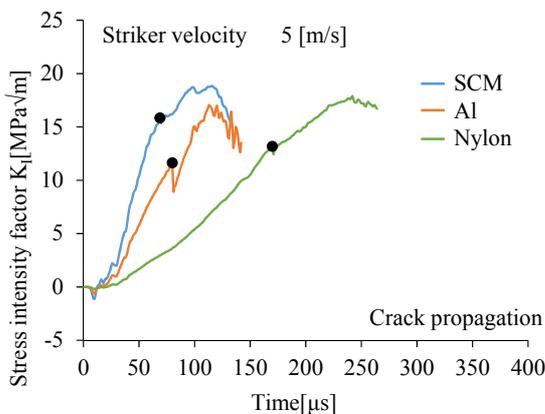


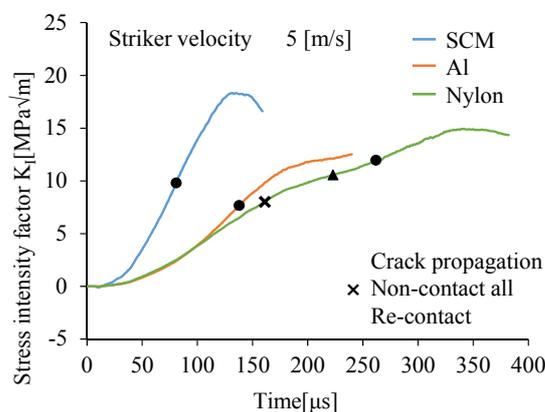
Fig.5 High speed image for fracture behavior in FC200 specimens

(自由境界扱いとした)。非接触状態移行後は試験片変位とストライカー変位の相対関係により再接触(非接触状態から接触状態への移行)を判定した。

図6(a)(b)は各々、円柱型先端、楔型先端を有する各種材料製ストライカー衝突について、数値解析より得た応力拡大係数履歴を示している。いずれの関係も横時間軸の原点はストライカー衝突時刻にとっている。き裂進展開始に要する時間は実験結果に準じている。この時間はストライカー材料の剛性に依存し、MC ナイロン>A2024>SCM440 の順に長くなっている。円柱型先端ストライカーでは楔型よりも短時間で多量のエネルギーが試験片に流入するため、き裂進展開始時刻が早くなっている。MC ナイロン製の楔形先端ストライカーの衝突破壊実験では、試験片とストライカーが完全に非接触状態になり、その後再接触している。このような境界条件の変化により破壊完了に要する全時間もかなり長引いている。ストライカー材料の剛性が低いMC ナイロンやアルミ合金 A2024 では、破壊時(き裂進展開始後)の応力拡大係数は増大し続けており、定常的な破壊が生じているとは考え難い。しかしストライカー材料がSCM440 製で先端円柱型の場合、き裂進展開始後の応力拡大係数は比較的安定している。この結果からは、短時間で高エネルギーを破



(a) Striker-tip shape: cylindrical



(b) Striker-tip shape: edge

Fig.6 Stress intensity factor histories for each striker-tip type and each striker material

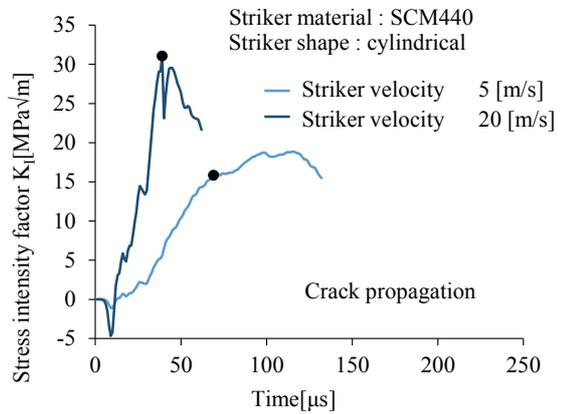


Fig.7 Stress intensity factor histories for each collision velocity (Striker-tip shape: cylindrical, Striker material : SCM440)

断材に入力することがき裂進展の定常化に有効と推察された。

上記の結果を受けて、SCM440 製先端円柱型ストライカーの衝突速度を 5m/s, 20m/s とした各実験・数値解析を行った。図7に応力拡大係数履歴を示す。初期衝突速度を約 20m/s とすると、き裂進展開始・破壊完了までの時間はより短縮されている。しかし、初速 20m/s 衝突時のき裂進展中の応力拡大係数推移は 5m/s 衝突時と較べて乱れており、安定なき裂進展とは言い難い。図 6,7 では、衝突速度やストライカー先端形状に応じてき裂進展開始時の応力拡大係数(動的破壊じん性)も変化しており、過剰な高速負荷はき裂進展を不安定化させる傾向が示された。

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 1 件)

・曹圭春、下園力、藤本岳洋、西岡俊久、
“Experimental and Numerical Study on the Dynamic Fracture Characteristics of Grey Cast Iron FC200”, Applied Mechanics and Materials Vol. 566 (2014) pp 274-280 Online: 2014-06-20

[学会発表](計 16 件)

・圓尾恭平、村上智洋、藤本岳洋、“コネクティングロッド破壊挙動の3次元移動有限要素解析”、日本機械学会 第26回計算力学講演会 CMD2013、佐賀大学大学院工学系研究科、2013年11月2~4日

・村上智洋、圓尾恭平、藤本岳洋、“コネクティングロッド破壊挙動の超高速度観察”、日本機械学会 第26回計算力学講演会 CMD2013、佐賀大学大学院工学系研究科、2013年11月2~4日

・柏原一仁、藤本岳洋、“様々な切り欠き先端からの高速破壊挙動の超高速度撮影”、日本機械学会関西支部第90期定時総会、京都大学桂キャンパス、2015年3月16日

・岡田晃明、柏原一仁、藤本岳洋、“3次元移動有限要素法によるコネクティングロッド後続破壊挙動の影響評価”、日本計算工学会、

第 20 回計算工学講演会、つくば国際会議場、2015 年 6 月 8～10 日
・小椋隆寛、曹 圭春、藤本岳洋、“3 次元移動有限要素法を用いた鋳鉄材の動的破壊経路評価”、日本計算工学会、第 20 回計算工学講演会、つくば国際会議場、2015 年 6 月 8～10 日
・笠見諒介、曹 圭春、藤本岳洋、“衝突時の接触・非接触及び衝突材・衝突形状を考慮した金属ぜい性破壊挙動の移動有限要素解析”、日本計算工学会、第 20 回計算工学講演会、つくば国際会議場、2015 年 6 月 8～10 日
・岡田晃明、柏原一仁、藤本岳洋、“様々な初期切り欠き径からの後続破壊挙動に関する 3 次元有限要素解析”、日本機械学会、第 28 回計算力学講演会、No.63、横浜国立大学、2015 年 10 月 10～12 日
・笠見諒介、曹 圭春、藤本岳洋、“鋳鉄破壊挙動の衝突依存性評価の移動有限要素解析”、日本機械学会、第 28 回計算力学講演会、No.129、横浜国立大学、2015 年 10 月 10～12 日
・藤本岳洋、柏原一仁、岡田晃明、“衝撃三点曲げ下の切り欠き端破壊挙動に関する弾塑性移動有限要素解析”、日本機械学会、第 28 回計算力学講演会、No.281、横浜国立大学、2015 年 10 月 10～12 日
・横尾和磨、藤本岳洋、“ストップホールによる疲労き裂成長抑止効果の力学的評価”、日本機械学会、M&M2015 材料力学カンファレンス、慶応義塾大学矢上キャンパス、2015 年 11 月 21～23 日
・高橋明生、藤本岳洋、“数値解析による混合モード作用下疲労き裂成長の応力拡大係数評価”、日本計算工学会、第 21 回計算工学講演会、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター、2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日、受付 No.100216
・三石 学、藤本岳洋、“き裂進展経路予測理論によるぜい性材破壊挙動の評価”、日本計算工学会、第 21 回計算工学講演会、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター、2016 年 5 月 31 日～6 月 2 日、受付 No.100211
・石川貴大、藤本岳洋、“傾斜衝突下の予き裂三点曲げ破壊試験片のき裂進展挙動解析”日本機械学会、M&M2016 材料力学カンファレンス、神戸大学六甲台第二キャンパス、2016 年 10 月 8～10 日
・石橋正晃、藤本岳洋、松山靖典、“衝撃試験と数値解析を用いた破壊じん性評価法に関する研究”、日本機械学会、M&M2016 材料力学カンファレンス、神戸大学六甲台第二キャンパス、2016 年 10 月 8～10 日
・石川貴大、小椋隆寛、藤本岳洋、“衝突体中の動的破壊における打撃端形状依存性に関する研究”、日本機械学会、第 29 回計算力学講演会 (CMD2016) 名古屋大学東山キャンパス、2016 年 9 月 22～24 日、受付 No.086
・藤本岳洋、島田光平、“疲労き裂成長抑止・緩和法に関する数値シミュレーション”、日本

機械学会、第 29 回計算力学講演会 (CMD2016) 名古屋大学東山キャンパス、2016 年 9 月 22～24 日、受付 No.125

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 岳洋 (FUJIMOTO, Takehiro)
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
研究者番号：60314514

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

津田 徹 (TSUDA, Tooru)