

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04582

研究課題名（和文）Peridynamicsを用いた脆性材料の動的破壊挙動の評価に関する研究

研究課題名（英文）Dynamic Fracture Analysis for Brittle Material Using Peridynamics

研究代表者

田中 智行（Tanaka, Satoyuki）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：20452609

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：輸送機器や溶接構造物は運用中にき裂や損傷が生じることが多い。それらの損傷が大きくなると大規模な構造破壊が生じる可能性がある。これらの問題を力学および材料面から評価する学問が破壊力学である。一般的な構造に破壊力学を適用する場合、数値解析を用いる方法がある。数値解析では解析対象を高精度にモデル化する必要があるが、き裂や損傷を含むモデル化は容易ではない。本研究では、き裂を含む構造やき裂が生じた構造を高精度にモデル化を行う方法として Peridynamics を用いる。本研究は、Peridynamics を用いた高精度な破壊力学評価に資するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、Peridynamics を用いて動的き裂進展現象の評価およびその高精度化を行うことができた。これまで構造解析で用いられてきた有限要素法と比較して、き裂を含む構造のモデル化の自由度が高く、かつ、既存の結果と比較しても遜色ない動的き裂進展挙動を行える数値解析法を構築することができた。

研究成果の概要（英文）：When operating transportation vehicles and welded structures, there are possibility to generate fracture and damage in the structures. Under further mechanical loading, the fracture and damage will be developed. Fracture mechanics; it is one of the evaluation techniques for the fracture behaviors from material and mechanics aspects. In evaluating the cracked structures, numerical simulation is one of the methods. Accurate numerical modeling is required for the simulation, however, there are difficulties to accurately model the cracked structure or the fracture behaviors. In the present study, Peridynamics is studied as a new method to analyze cracked structures. Accurate fracture evaluation using Peridynamics is studied.

研究分野：船舶海洋工学

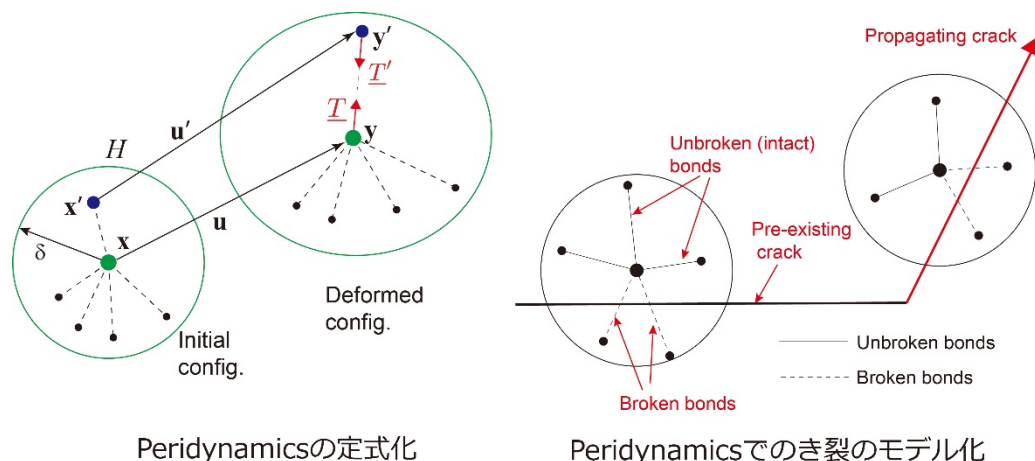
キーワード：Peridynamics 破壊力学 脆性材料 メッシュフリー/粒子法 有限要素法 動的破壊

1. 研究開始当初の背景

近年、き裂を含む固体や構造物の数値解析手法として Peridynamics と呼ばれる方法が提案された。この構造解析法は従来の有限要素法で用いられてきた平衡方程式を基礎として離散化する方法とは異なり、積分方程式で記述される各物質点(粒子)での運動方程式を用いて物体の変形や破壊現象を評価する。この解析方法は一種のメッシュフリー法/粒子法であり、物体が飛散したりバラバラになるような問題を比較的簡便に取り扱える方法として期待されている。従来型の有限要素法では解くことの難しい複雑な破壊現象を評価できる可能性があり世界中で活発な研究が行われている。一方、数値解析手法としては研究段階にあり、解析精度、境界条件の規定方法、き裂のモデル化、き裂進展のクライテリアなど、検討が不十分な点もあり課題となっている項目も多い。

我々の研究グループでは、これまでも有限要素法、メッシュフリー法/粒子法などの様々な数値解析法に関する研究を行ってきており、さまざまな解析技術およびそれらに関する経験や知見を有している。本研究では、Peridynamics を実際の破壊問題へ適用するための、数値解析上の様々な問題を検討し、改善、高精度化することを目的とした。

下の図は Peridynamics の定式化およびき裂進展時のき裂のモデル化のイラストである。Peridynamics は初期状態と変形状態で運動方程式を用いて変形を表現する。それぞれの粒子はある関数幅(ホライゾン)を有しており、ホライゾン内に存在する全ての粒子と結合関係(ボンド)を持ち作用反作用の関係を満足する内力が存在している。さらに、き裂をモデル化する場合、き裂をまたぐ粒子のボンドを切断することで表現する。



2. 研究の目的

これまでの体系的な破壊力学研究により、き裂先端の物理量がある状態になった場合、き裂がどの程度の速度でどの方向に進むという、き裂の物理量を決定する基準(クライテリア)が存在することが知られている。一方、Peridynamics が提案された当初から、解析方法だけでなくき裂進展クライテリアにおいても従来の破壊力学解析で用いられてきたものとは異なる方法が提案され、それらを用いて解析している事例が多い。一方、対象とする物理現象は一つであり、これまで用いられてきた有限要素法を用いても Peridynamics を用いても同様な結論を得られることが望ましい。そこで、Peridynamics 解析法およびそれによって新しく提案されたクライテリアと、従来の破壊力学で用いてきたき裂進展解析の関係性について詳細に検討を行う必要があった。

そのため、我々の研究グループでは、最初の検討課題として Peridynamics 独自のき裂進展クライテリアを用いるだけでなく、従来用いられてきた破壊力学パラメータを用いて静的荷重下の停留き裂、動的荷重下の停留き裂およびき裂進展解析が可能であるか検討した。具体的には、Peridynamics によるき裂進展挙動評価に関する基礎的検討の実施、き裂進展開始、進展中の動的 J 積分や動的応力拡大係数などの破壊力学パラメータを評価できるプログラムの作成、さらに、数値解析のみの評価だけでなく実験的研究から得られる知見も重要であることから、鋼材や

PMMA（アクリル樹脂）など脆性的な挙動を示す材料の破壊試験を実施することとした。

3. 研究の方法

主に数値解析的研究を行い、さらに実際の破壊現象を把握するため実験的研究を行った。

数値解析的研究では、従来作成してきたプログラムを拡張する形で研究を実施した。これまでの研究で静的および動的荷重を受ける停留き裂の応力拡大係数および動的応力拡大係数を評価することは可能となっていた。以下の手順で研究を進めた。

1) まず、き裂進展時での動的応力拡大係数を高精度に評価するためのプログラム作成を行った。2) 引張荷重があまり大きくない領域にき裂が突入した場合、き裂が停留することが知られており、このき裂停留現象を評価するために、既存の実験結果および解析結果をもとに generation phase および application phase の解析を実施した。3) 一般的な Peridynamics 解析では解析対象を一樣な粒子密度分布で解析を行う。き裂先端などの詳細な現象を評価するためには細かい粒子密度が望ましく、計算効率の点から、それ以外の領域では粗い節点密度を用いることが望ましい。そこで、一つの解析対象内で異なる節点密度を持つ Peridynamics 解析のプログラムを作成し、それにより生じる問題に対して新しい知見を導入して、効率的な解析が行えることを示した。

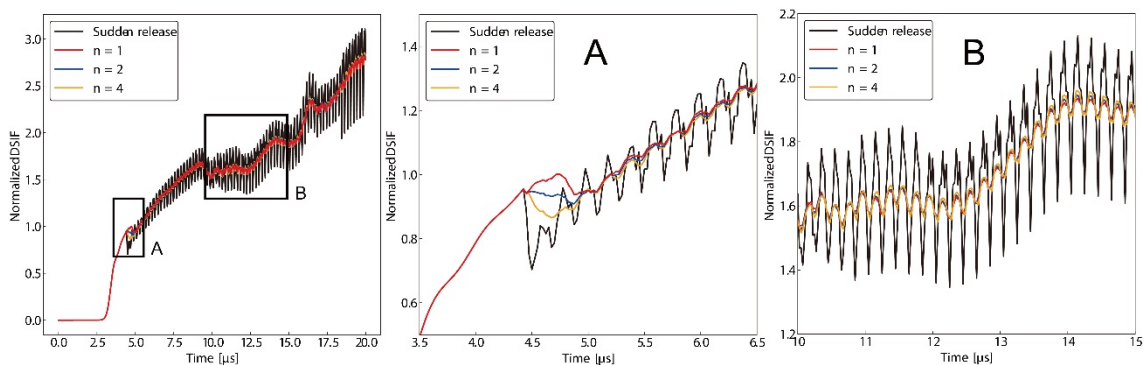
実験的研究では、本研究室が所有する引張試験機を用いて破壊試験用のジグを作成した。さらに、鋼材および PMMA を用いて CT 試験片を作成し、引張荷重により破壊させる実験を行った。

4. 研究成果

得られた研究成果を以下に示す。

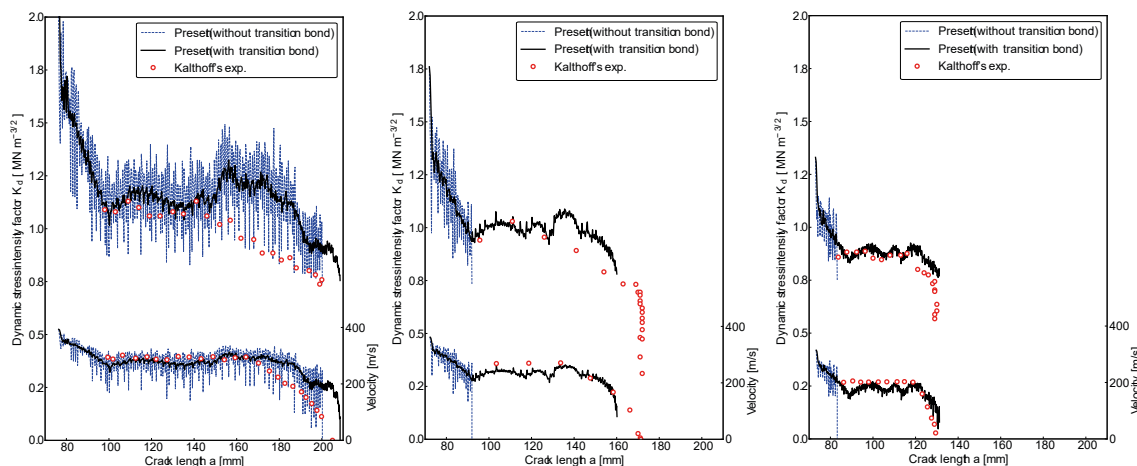
2018 年度は、Peridynamics の解析方法の一つである Ordinary state-based Peridynamics を用いて従来使用されてきた破壊クライテリアである動的 J 積分および動的応力拡大係数をもとに動的き裂進展解析を実施した。粒子間の結合(ボンド)を切断することでき裂の自由表面を評価した。Peridynamics では動的にき裂を進展させる際に構造全体に数値振動が発生することを報告し、その回避方法として新しいボンド破壊のモデル化を提案した。それにより動的き裂が進展することに伴う数値振動を抑えることができ、高精度な動的応力拡大係数の評価が可能となった。

本手法をモード I 状態の動的破壊問題に対して適用し、解析結果の精度、数値振動の影響など詳細に検討した。さらに混合モード問題として Kalthoff-Winkler 衝撃試験を用いて動的応力拡大係数およびき裂進展方向について検討を行った。これらの数値解析結果より作成した Ordinary state-based Peridynamics のプログラムは高精度な評価を与えることが確認できた。下の図は、パラメータ n を変更した場合の動的応力拡大係数の振動と、提案法によりその振動が抑えられていることを示している。



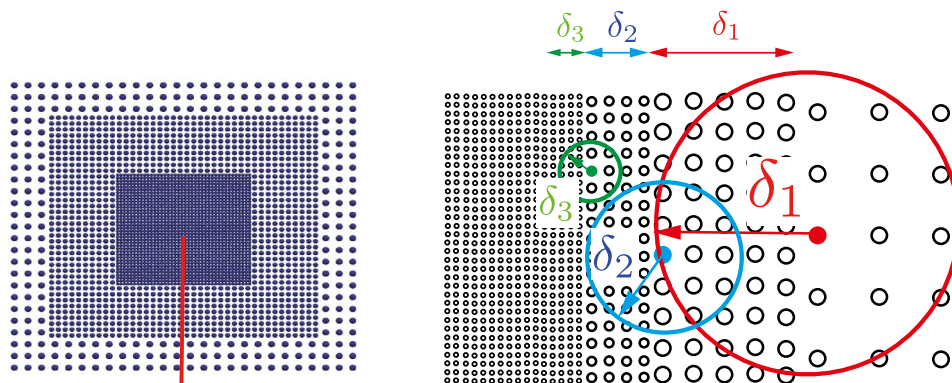
2019 年度は、2018 年度に引き続いて脆性材料の破壊発生からき裂進展・停止の挙動について数値解析手法の研究を主に実施した。Ordinary state-based Peridynamics の定式化、離散化を用いてき裂伝播、停止現象の数値解析を実施した。動的荷重下でき裂が進展すると力学現象とは無関係の数値振動が発生する。Imachi et al. (2018)により提案された transition bondを用いて DCB 試験片の高速き裂進展問題の評価を行った。

この研究は generation phase と application phase の二つにより評価される。まず、generation phase において実験により得られたき裂進展履歴を用いてそのときの動的応力拡大係数を評価する。さらに、application phase では動的応力拡大係数と速度の関係をを用いてき裂停止位置を評価する。これらは Kalthoff による実験データをもとにこれまでにもさまざまな数値解析法により評価されてきたベンチマーク問題である。本研究で用いた Ordinary state-based Peridynamics と transition bond による結果において、動的応力拡大係数およびき裂進展停止位置とも実験結果および既存の数値解析結果と良好な一致を示した。また、transition bond を導入することによりき裂進展に伴う数値振動の抑制に効果があることを確認した。下の図は Kalthoff による実験データをもとに Peridynamics で実施した application phase の数値解析例である。

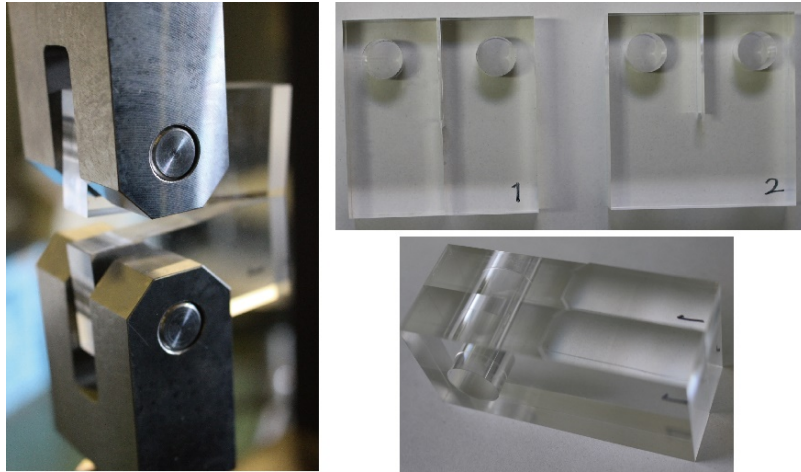


2020年度は、異なる解像度を持つ Peridynamics モデルを用いた構造解析および破壊現象のモデル化およびその解析精度に関する研究を行った。また、アクリルおよび鋼材の CT 試験片を制作し、破壊試験を実施し、動的き裂進展に関する基礎検討を行った。

まず、異なる解像度を持つ Peridynamics モデルに関する研究では、き裂先端など激しい応力集中が生じる部分に対して細かい粒子分割を用いるとともに解像度の異なる遷移領域で影響関数を徐々に変化させる方法の提案を行った。さらに、その妥当性について内力の誤差および動的応力拡大係数を評価することにより提案する解析の妥当性について検討した。異なる解像度を用いたモデルを作成し、それらの解像度の差が解析結果におよぼす影響について詳細に検討を行った。下の図はき裂先端周りに対して異なる解像度の粒子を用いたモデルおよび、ホライゾンサイズの定義を示している。



CT 試験片による実験では、試験のためのジグおよびアクリルおよび鋼材の CT 試験片を制作した。引張荷重を加え CT 試験片破壊時の荷重-変位曲線および試験後の破面観察を行うことにより、異なる材料を用いた場合の動的破壊現象に関する基礎的検討の評価を実施した。適切に試験を行うことができ、これまでの試験結果と比較しても妥当な結果を得ることができた。下の図は、アクリルで制作された CT 試験片の脆性破壊試験結果の一部である。今後、これらの実験結果を精査し、Peridynamics による数値解析との比較を行ってゆく。



以上の研究を通して、Peridynamics の動的き裂進展問題に対してこれまでの破壊力学の知見および数値解析的アイデアを取り入れながら、高精度な解析が可能となった。そのため、最初に目標とした研究を達成することができたと思われる。さらに、異なる解像度を持つモデルに対する検討も行うことができ、最初に設定した目標以上の成果を得ることができたと思われる。今後は、現在実施している脆性破壊試験結果と Peridynamics の数値解析と比較するなどして、数値解析手法の高精度化および動的破壊問題、脆性破壊問題の力学現象解明について詳細な検討を行ってゆく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Michiya Imachi, Satoyuki Tanaka, Murat Ozdemir, Tinh Quoc Bui, Selda Oterkus, Erkan Oterkus | 4. 巻 221 |
| 2. 論文標題 Dynamic crack arrest analysis by ordinary state-based peridynamics | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Fracture | 6. 最初と最後の頁 155-169 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10704-019-00416-3 | 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 Michiya Imachi, Satoyuki Tanaka, Tinh Quoc Bui, Selda Oterkus, Erkan Oterkus | 4. 巻 206 |
| 2. 論文標題 A computational approach based on ordinary state-based peridynamics with new transition bond for dynamic fracture analysis | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics | 6. 最初と最後の頁 359-374 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engfracmech.2018.11.054 | 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 Michiya Imachi, Takaaki Takei, Murat Ozdemir, Satoyuki Tanaka, Selda Oterkus, Erkan Oterkus | 4. 巻 232 |
| 2. 論文標題 A smoothed variable horizon peridynamics and its application to the fracture parameters evaluation | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Acta Mechanica | 6. 最初と最後の頁 533-553 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00707-020-02863-9 | 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 |

〔学会発表〕 計0件

〔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 | | | |
|---------|------------|--|--|--|
| 英国 | ストラスクライド大学 | | | |