論　文　の　要　旨

題目　種々の破壊問題に対する Ordinary State-Based Peridynamic モデルの提案およびその応用
(Numerical Modeling and its Application for Fracture Problems employing Ordinary State-based Peridynamics)

氏名　井町　美智也

構造物は材料特性および荷重負荷条件より脆性破壊，延性破壊，疲労破壊，準脆性破壊等の様々な破壊現象が存在し，破壊現象およびき裂伝播現象の解明は工学分野において長年の課題である．現象解明や安全性評価のため，実験および数値解析の両面から精力的な研究がなされてきた．例えば，船体構造分野においてコンテナ船の大型化により極厚鋼板が使用される機会が増加している．板厚が増加することにより脆性破壊が生じやすい傾向がある．極厚鋼板の場合，板厚方向に異なるき裂伝播速度が観測され，脆性破面と延性破面が混在することが確認されている．脆性破壊が支配的にも関わらず同時に延性破壊を考慮する必要があり，現象が複雑化してきている．このような現象の複雑化により従来数値解析手法では適応が困難となってきており，数値解析技術の発展がいっそう要求される．

今日，構造解析および強度評価には有限要素法が広く用いられている．有限要素法は，構造物を小領域（メッシュ）に分割し，連続体力学理論に基づく支配方程式を解くことにより，物理現象を再現する方法である．有限要素法により高精度な構造解析および構造評価が行われているが，その一方で，構造物が大変形しメッシュが大きく歪む場合，解析精度が劣化することが知られている．また，き裂や破壊等の不連続現象を扱う場合，破壊後の連続体を再定義しメッシュを再生成する必要がある．このように有限要素法はメッシュに起因する問題点が指摘されている．

粒子法/メッシュフリー法は，粒子群により構造物をモデル化する数値解析手法であり，有限要素法に対しメッシュに依存しない手法として精力的に研究が行われてきた．粒子法/メッシュフリー法は連続体力学を基礎としたものであり，平衡方程式の強形式もしくは弱形式を解くものが大半を占める．構造解析において強形式は高次の微分項が含まれており，数値不安定性が指摘されている．一方，弱形式は平衡方程式をガラーキン法により境界値問題として扱うものである．それゆえ，有限要素法同様に物体を小領域に分割する必要があり，本質的に有限要素法と大差ない．

Peridynamics(PD)は従来の粒子法/メッシュフリー法に属さない数値解析手法である．PD は分子動力学を基礎とし，連続体力学のスケールへ拡張したものである．基礎概念は分子動力学同様に粒子間力を考慮した運動方程式を用いるものであるが，粒子間

力を分子のポテンシャルではなく連続体力学をもとに導出する理論である. 粒子法同様に粒子群により構造物のモデル化を行うため，大変形や破壊解析に対し有効である．本研究では，PD モデルのひとつである Ordinary state-based PD を用いていくつかの研究を行った.

これまでに PD を用いてさまざまな脆性破壊解析が行われ, その有効性が示されてきたが，その一方で，従来実績のある破壊力学を用いた比較検証など十分な精度および妥当性検討が行われておらず議論の余地がある．本研究では，破壊力学に基づく破壊力学パラメータの算出方法の確立, それを用いた破壊モデルの提案およびその検討を行った. さらに，従来 PD 理論では空間解像度固定の制限があり，計算コストが問題視されていた. 本研究では, 空間解像度固定の制約を解消する定式化を提案し, その検討を行った.

各章の要点を以下に示す.

第 1 章では，本研究の目的および背景について述べた．本研究で扱う PD を説明するに当たり，有限要素法をはじめ粒子法/メッシュフリー法などいくつかの数値解析手法に関して述べた．従来の PD 研究および問題点を提示し，本研究の着目点および位置づけを示した.

第 2 章では，PD 基礎理論を示した．PD model に代表される Bond based model, Ordinary state-based model を示し，連続体力学理論と PD 理論との関係性を示し，相互作用力関数の導出を示した．また，PD でよく用いられる破壊モデルを説明した.

第 3 章では，PD における応力拡大係数の算出方法を提案し，その妥当性を示した．破壊クライテリオンとしても用いられる応力拡大係数を PD の枠組みでの算出方法を示した．ひずみテンソル等の連続体力学で定義されるパラメータは PD 理論において定義されない．それゆえ，近似関数を用い連続体力学パラメータを導出し，応力拡大係数を算出した．いくつかの数値解析例を用い，経路独立性など定量的評価を行い高精度な動的応力拡大係数を算出した.

第 4 章では，前章で提案した応力拡大係数算出方法をき裂伝播問題へ拡張した．数値解析例を用いて動的応力拡大係数を算出し，き裂伝播に際し，き裂先端近傍で数値振動が生ずることを指摘した．指摘した数値振動に対し，Transition bond と呼ばれる新たな破壊モデルを提案し，数値振動を抑制した．また，提案した Transition bond を用いてき裂伝播および停止問題へ拡張し，本手法の有効性を示した.

第 5 章では，PD モデル生成に関して，空間解像度固定の制約を解消する定式化を示した．従来 PD 理論において，相互作用力の関係より空間解像度が固定されるという制約が存在した. この制約は空間解像度を変更に伴うニュートン第三法則の不成立が問題であった．それゆえ，ニュートン第三法則を満足する新たな定式化を示した．また，空間解像度を変更することによる数学的に数値誤差を生じることを示し, その抑制方法を示した．いくつかの数値解析例を用い，本定式化の妥当性を示し，計算コストを低減す

ることに成功した．

第6章では，PDモデルを接触問題へ適用した．従来提案されていた接触モデルに対し，前章で示した空間解像度を変更可能な定式化へ拡張した．また，接触モデルに関連するパラメータの妥当性を検討した．解析解と比較し，本手法の妥当性を示した．

第7章では，本研究の総括を示した．古典破壊力学に基づきPDの精度を検証し，き裂伝播問題へ拡張した．き裂伝播に伴う数値振動を指摘し，その解決策としてTransition bondモデルを提案した．提案した手法を用いることで，実験結果および参照解と良好な一致が得られることを示した．その後，PDの空間解像度を任意に取り扱うため従来PD理論を再定式化した．また，空間解像度の変化に伴う数値誤差を低減する手法を提案した．さらに，開発した手法を接触問題へ拡張し，参照解を良好な解の一致を示した．提案した手法により効率的な離散モデルが生成および精度向上を達成した．

PD は破壊解析に対し有効な手法であり，比較的 3 次元拡張性の自由度が高く，複雑な破壊問題への適用が期待される．本研究では，その利点を保持しつつ高精度な破壊解析が達成できた．今後の展望として， 3 次元き裂伝播および停止問題への拡張や脆性破壊と延性破壊が同時に発生する混合破壊モデルの開発などが考えられる