論　文　の　要　旨

題目　　　メッシュフリー法を用いた板構造物の非線形解析に関する研究
(Nonlinear analyses of folded-plate structure using meshfree method)

氏名　貞本　将太

船舶や航空機などの大型の輸送機器は，その構造部材の多くが薄板を組み合わせた構造によって構成されている．局所的に大きな力が働く場合は当然ながら，板の面方向に荷重が加わり耐力に影響を及ぼす場合も少なくない．面方向の圧縮荷重がある値まで達したとき板は座屈し，大きなたわみを発生させる．さらに大きな力が加われば座屈変形が進展し材料が塑性状態となり，やがて最終強度に到達し破壊に至る．従って，大変形問題である板の座屈/座屈後挙動を推測し，材料特性を考慮することは機器の信頼性の観点から非常に重要なことであり，高精度なシミュレーションが行えることは必須である．このことから本研究では板構造物の非線形問題に着目した．

メッシュフリー法，あるいは粒子法は，その名の通り有限要素解析（Finite Element Analysis, FEA)における計算格子(メッシュ)を用いない数値解析手法であり，連続体内部に節点や粒子と呼ばれる離散的な評価点を配置してモデル化を行い，その変形をラグランジュ的に表現する．このため，FEA においてはメッシュの影響を受けやすい流体挙動や大変形問題の表現，あるいは破壊現象の取り扱いに対して比較的有利な手法として知られている．しかしながら，一般的な固体/構造解析については未だ FEA と同程度の精度を得ることができておらず，本来の利点を活用しきれていない．これは板構造物の構造解析においても同様であり，板理論に基づいて簡単な例題を解いた例はいくつかあるものの，様々な曲面の問題や一般的な板構造物の非線形問題を取り扱った例は著者の知る限りでは無い．種々の条件下の板構造物の解析において FEA に劣らない高精度な計算が実施できるようになれば，本来メッシュフリー/粒子法が得意とする大規模な有限変形問題や破壊後の挙動の表現，また構造流体連成問題などの発展に大きく寄与できる可能性がある．このことから本研究では，弱形式を用いたメッシュフリー/粒子法の一手法である Reproducing Kernel Particle Method (RKPM)を用いて，種々の板構造物の非線形解析を高精度に実施することを目的とし，手法開発を行った．

以下に各章で得られた要点を示す．

第 1 章では，本研究の目的と背景について述べた．板構造は様々な機器に用いられる構造部材であり，高精度なシミュレーションが行えることは必須である．一般的に板構

造の解析にはFEAが用いられるが，FEAはメッシュが破綻するような大変形問題や破壊現象の取り扱いはあまり得意ではない．一方でメッシュフリー/粒子法はこれらの現象の表現を得意とするが,肝心の構造解析の精度においては近似方法や積分方法などの問題により十分な精度が得られていない．従来メッシュフリー/粒子法で板を取り扱った研究例自体はあるものの,解かれる例題は計算手法の精度確認のための単純な問題が多く，構造解析に対するアプリケーションという観点からの研究例はほとんど無い．従って本研究では，種々の条件のもとで板構造物の非線形解析を高精度に実施することを目的とし，手法開発を行った．

第2章では,RKPMを用いた平板の線形解析について説明した．RKPMではReproducing Kernel (RK)近似と呼ばれる関数近似方法を用いて離散化を行う．RKは全体の節点に配置されたスプライン関数を節点分布に従って補正し，FEAで言うところのPartition of Unity (PU)条件に代わる特性を持たせた形状関数である．本章では板曲げ問題においてRKを構成するための条件について示し，得られたRKを用いて板の微小変形問題における仮想仕事式を離散化した．また，メッシュフリー/粒子法では節点や粒子によって連続体が離散化されるため,数値積分方法を工夫しなければ境界値問題が厳密に成立しない．RKPMにおいてはスムージングを用いるStabilized Conforming Nodal Integration (SCNI)という節点積分法がこれを満たす高精度な数値積分手法としてしばしば用いられる．しかしながら，構造解析の観点からこの積分手法を見てみると，従来の研究例では十分な検討がなされていないことがわかった．本章の数値解析例では，微小変形問題の定式化の妥当性の確認と共に，この節点積分法に関する問題を検証した．

第3章では,メッシュフリー/粒子法における多点拘束（Multiple-Point Constraint, MPC）法による境界条件の取り扱いについて説明した．メッシュフリー/粒子法の形状関数は各々がFEAにおいてクロネッカー・デルタ特性と呼ばれる性質を持っていないため，境界条件の規定方法にも様々な方法がある．板の構造解析では，一般的な基本境界条件に加えて構造の連続性や周期性を考慮した特殊な境界条件がしばしば課されるが，これらの特殊な境界条件には自由度のタイイングが必要となる．この条件を規定するために本手法では MPC 法を用いた．MPC 法では近似値の拘束や同期などの拘束条件式に基づいて節点変位ベクトルを書き換えることで種々の条件が規定できる．ただし，MPC 法の定式化は従来提案されているものの，方法の適用に関する詳細な検討はなされておらず，本手法に導入した際に適用箇所近傍で応力が振動する問題が生じた．本章ではこの問題について原因を究明し，回避策及び実際の構造解析に適用する際に留意すべき点について述べた．また，MPC 法による自由度の同期を応用した例として，複数の板による組み合わせ構造のモデル化を提案した．三次元的な自由度の整合性のために3軸回りの面内回転剛性を導入し，複数の板による構造系をモデル化するための自由度の変換方法について示し,数値解析例によって組合せ構造に関するMPC法適用の妥当性を検証した．

第 4 章では，第 2 章に示した平板の微小変形問題の定式化を，有限変形を取り扱うための幾何学的非線形問題へと拡張した．微小変形問題において用いられる応力テンソルやひずみテンソルは変位に関して線形であるが，有限変形問題において基礎となる仮想仕事式は変位に関して非線形となる方程式である．従って，方程式の増分分解と線形化によって解くべき増分系の方程式を導いた後に RK 近似による離散化を行った．定式化の妥当性を検証するため数値解析例を示し，また座屈解析のための周期的な境界条件や直線保持などの条件を MPC 法により与え，改めて MPC 法の適用に関する評価を行った．

第 5 章では，任意曲面のための曲面座標系を用いたシェルの定式化を示した．これまでに示した定式化は平板の変形に限定されたものであり，数値積分方法や基本境界条件について基礎的な検討を実施して妥当性を確認したものの，曲面を表現することを考えると不便である．FEA であれば 1 つのメッシュが連続体として考えられているため，その平板要素を連ねて近似的に曲面を表現できるが，メッシュフリー/粒子法においては基本的に 1 枚の板全体を 1 つの連続体として考えるため，この方法は当てはまらない．従って本章では，曲面内に埋め込まれた曲面座標系を用いて幾何学的非線形問題の定式化を行った．また，非線形問題の増分制御法の一種である弧長増分制御について示した．単純な問題では荷重増分制御や変位増分制御などが用いられるが，これらの方法は荷重増分，もしくは変位増分を制御変数とするため，変形が進むにつれて荷重や変位が下がるスナップという現象が起こる問題では計算が破綻してしまう．この問題を解消するために弧長増分制御を導入した．さらに第 3 章に示した平板の定式化における面内回転剛性を曲面座標系における定式化に書き換えることで，曲面座標系においても複数の板による組み合わせ構造物の解析を取り扱えるようにした．数値解析例では FEA においてシェル要素のベンチマークとなる種々の問題を解き，また組合せ構造物の非線形問題を解くことで，提案手法の妥当性を確認した．

最後に第 6 章では，本研究の総括及び今後の課題について示した．微小変形問題において数値積分方法や境界条件の規定方法，三次元的な板の組合せ構造のモデル化について種々の検証を実施し，得られた知見を曲面座標系を用いたシェルの定式化に反映することで，板による任意の構造系を高精度に解くための手法が開発された．以上をもって，本研究の目的は達成されたといえる．今後は，本手法に対して更なる拡張を施し，より汎用的な手法へと発展させていく必要がある．具体的には以下の 3 点が挙げられる．

- 幾何学的な非線形性に加えて，材料的な非線形問題である弾塑性構成式の適用．
- メッシュフリー/粒子法が本来得意とするところである破壊力学分野への適用．
- 水や空気などの流体や板構造などを含む計算対象全体を節点/粒子でモデル化した流体構造連成問題への適用．