論　文　の　要　旨

題目　　　Euler 型拡張有限要素法による粘性-超弾性体の数値解析手法の研究
（Visco-Hyperelastic Solid Analysis Method using Eulerian eXtended Finite Element Method）

氏名　西口　浩司

近年，コンピュータ性能の飛躍的向上と計算力学の進歩によって，様々な力学現象の数値シミュレーションが可能となっており，造船・自動車・航空機・土木・建築など広範な分野において数値シミュレーションは重要な役割を果たしている．その一方で，高分子ゲル・粘着剤・B ステージ樹脂などの柔らかい高分子材料の設計においては，数値シミュレーションが十分に活用されていない場合も多い．例えば粘着剤の場合，数値シミュレーションの研究としては，微視的スケールでは森田らによる分子動力学法の研究があげられる．分子動力学法によるアプローチでは，分子レベルの微視的スケールから有理的なモデル化を行える反面，解析可能なスケールが著しく小さいため連続体スケールの数値シミュレーションは現状では困難である．一方，連続体スケールでは，山口らのプローブタック試験の剥離過程を簡略化したモデルを用いた Lagrange 型有限要素法の研究があげられる．この研究は，プローブタック試験の数値シミュレーションにおいて，応力-ひずみ曲線の精度の良い再現に成功するなど顕著な成果をあげている．ただし，この手法はプローブタック試験の変形に限定されており，より一般の変形挙動を取り扱うことができない．大変形や破断挙動の把握は高分子材料の開発において必要不可欠であるが，Lagrange 型有限要素法によるアプローチでは，大変形や破断挙動の数値シミュレーションは困難である．なぜなら，有限要素が物体の変形に追従する解法である Lagrange 型有限要素法では大変形や破断が生じると有限要素が破綻するからである．この点は，大変形や破断を生じやすい柔らかい高分子材料全般の数値シミュレーションで直面する問題であり，柔らかい高分子材料の設計において数値シミュレーションが十分に活用されていない主要な理由であると考えられる．そのため，柔らかい高分子材料の大変形挙動の数値解析には，有限要素メッシュが破綻することのない Euler 型有限要素法が有効であると考えられる．

Euler 型有限要素法による固体解析手法は Benson により提案され，Euler 型有限要素法をベースとして弾塑性体の大変形解析手法，大変形を伴う超弾性体と流体の連成解析手法などの開発が行われてきた．また，杉山らにより基礎方程式を全て差分法で離散化した Euler 型の固体-流体連成解析手法が提案され，血流解析などに適用されている．ただし，差分法に基礎を置く手法では，固体界面における力学的境界条件の取り扱いが困難である．そのため，本研究のように柔らかい高分子材料を主な解析対象とする場合は，

力学的境界条件を仮想仕事式の導出過程で自然に取り込むことができる有限要素法が適している．しかしながら，本研究で解析対象とする柔らかい高分子材料を Euler 型有限要素法で解析するには，次の 2 点の課題を解決する必要がある．

第一に，従来の Lagrange/Euler 型有限要素法では，柔らかい高分子材料の特性である温度依存性を考慮した粘性-超弾性の定式化が行われていないことである．本研究で対象とする柔らかい高分子材料は，粘性-超弾性および温度依存性を示すことが知られている．そのため，本研究で対象とする柔らかい高分子材料の大変形挙動の解析のためには，Euler 型有限要素法の枠組みにおいて，温度依存性を考慮した粘性-超弾性体を取り扱う手法の開発が必要である．

第二に，従来の Euler 型有限要素法では固体界面の滑りなどの不連続性をモデル化できないことである．従来の Euler 型有限要素法で複数の固体材料を扱う場合，ひとつの有限要素内に複数の固体材料が存在し得ることから，基礎方程式を空間平均化することで定義域内の速度場をC^0連続な関数とし，有限要素法による空間離散化を行ってきた．ただし，空間平均化により単一の速度場で複数の固体材料を扱うことになるため，固体と固体の界面が固着して固体界面の滑りなどの不連続性をモデル化できず，実用的な数値シミュレーションの妨げになることがあった．

そこで本研究では，固体界面の不連続性および温度依存性のある粘性-超弾性体を取り扱うことのできる Euler 型の数値解析手法を提案する．これにより，従来の Euler 型有限要素法では解析が困難である高分子ゲル・粘着剤・B ステージ樹脂などの柔らかい高分子材料の実用的な数値シミュレーションを可能にする．

2 章では，基礎方程式である連続の式と平衡方程式について述べる．高分子ゲル・粘着剤・B ステージ樹脂などの柔らかい高分子材料は，エラストマーに軟化剤，架橋剤，粘着付与剤などを付与して作成される高分子化合物であるが，本研究では連続体力学で記述される巨視的な系としてモデル化を行う．

3 章では，固体と固体の界面における滑り現象などの界面の不連続性が生じない場合に適用する，基礎方程式の空間平均化について述べる．Euler 型有限要素法で複数の材料を取り扱う場合，ひとつの有限要素内に複数の材料が存在し得る．従来の Euler 型有限要素法では，連続の式と平衡方程式を空間的に平均化して統一し，単一の速度場を求めることで複数の材料を解析する．ただし，単一の連続的な速度場となるため，固体同士が固着するモデル化となる．

4 章では，構成方程式について述べる．本研究では，固体に対して非圧縮性を仮定し，粘性-超弾性体または粘性の無い超弾性体の構成方程式を用いる．また，高分子ゲル・粘着剤・B ステージ樹脂などの柔らかい高分子材料の解析では，周囲の流体との連成問題の解析が必要な場合もあり得る．そこで，流体に対しては非圧縮性 Newton 流体の構成方程式を用いる．

5 章では，SMAC 法による基礎方程式の時間発展について説明する．SMAC 法は一般

には非圧縮性流体解析に用いられているが，本研究では物質の非圧縮性を仮定したEuler表示の基礎方程式を用いるためにSMAC法を適用することができる. SMAC法を用いることで，非圧縮条件により決定される圧力を効率的に求めることができる.

6章では，基礎方程式の空間離散化について説明する．空間離散化には，有限要素法と差分法を用いている．平衡方程式の空間離散化には，有限要素法を用いている．移流方程式，ポアソン方程式，速度修正式の離散化には差分法を用いている．

7章では，異種材料界面における不連続性のモデル化について述べる．従来の Euler型有限要素法で複数の材料を扱う場合, 連続の式と運動方程式を空間平均化することで定義域内の速度場をC^0連続な関数としてきた．しかし，その代償として材料界面が固着するモデル化になってしまい, 実用的なシミュレーションの実施の妨げになることがあった．そこで本研究では，拡張有限要素法（X-FEM）により速度場の拡充を行い，3次元 PLIC 法で規定した異種材料界面の接触条件をペナルティ法で制御する手法を提案する．この手法により，Euler 型解法の枠組みにおいて，異種材料界面の摩擦が無い滑り現象や摩擦がある滑り現象をモデル化できる．この手法は，従来の Euler 型有限要素法との定式化を大幅に変更することなく異種材料界面の不連続性をモデル化できる利点がある．また，ペナルティ法により異種材料界面の表面力が規定されるため，ペナルティ係数を変化させるだけで表面力を容易に操作できるという利点もある．

8章では, 3次元PLIC法による界面捕捉について説明する. 3次元PLIC法の計算は, (1)界面の法線ベクトルの計算，(2)境界面の再構築，(3)境界面の移流の3つ手順に分けることができる．法線ベクトルの計算では，注目する界面セルの周囲の体積率分布から計算する比較的簡単な方法を用いている．境界面の再構築では，従来の PLIC 法で用いられることの多かった反復計算を必要とする計算コストの大きい手法でなく, より高速で高精度な直接計算法を用いている．境界面の移流では，アルゴリズムが簡便になる各座標軸方向の移流を別々に行う方法を用いている．

9章では，種々の数値解析例により，本研究の提案手法の妥当性を検証し，柔らかい高分子材料の設計実務における有効性を示す．9.1 節では，アクリル系粘着剤の一軸引張試験の数値解析を行うことで，本研究で提案する温度依存性を考慮した粘性-超弾性体の定式化の妥当性を検証する．9.2 節では，粘着剤や樹脂の衝撃吸収性能評価のために行われる鋼球衝突試験の数値解析を行うことで, 本研究の提案手法の実務的解析における有効性を示す．9.3 節では，固体平面上における粘性-超弾性体の自重変形解析を行い，異種材料界面における不連続性のモデル化の妥当性を 2 次元問題で検証する．9.4 節では，異種材料界面における不連続性のモデル化の妥当性を 3 次元問題で検証する．9.5 節では，異種材料界面の不連続モデルを用いて，B ステージ樹脂による凹凸面の包埋挙動の解析を行い，B ステージ樹脂の製品設計における有効性を示す．