

論文の内容の要旨

論文題目 天然ガスハイドレート輸送・貯蔵システムへの
離散要素法の応用に関する研究

氏名 所 千晴

天然ガスは、その環境性や供給安定性から 21 世紀のエネルギー源として注目を集めている。天然ガスハイドレート (NGH) システムは、従来の LNG 技術を補完する新しい天然ガス輸送・貯蔵技術として近年急速に調査・研究が進められている。NGH は、自己保存効果により大気圧下、 -10°C 程度の環境下において固体状態で安定に存在することができ、LNG システムに比べて初期投資時において 20~30% 程度のコスト低減が可能とされている他、エネルギー効率の面でも 30% 程度の省エネおよび CO_2 の削減が可能と考えられている。輸送時の NGH の形態については、現在種々の検討がなされているが、自己保存性およびハンドリングに優れたペレット式が有望であると考えられている。しかし、NGH システムの概念は 1996 年に Gudmundsson が提唱したのが初めてであり、まだシステムの確立には至っていない。

本研究はペレット式 NGH 輸送・貯蔵システムの確立を目指すべく、その設計の根幹を成すと考えられるペレットの基礎物性および充填・排出特性の把握を目的とするものである。ペレットの挙動は粉粒体特有の非線形性を有するため、連続体シミュレーションでは十分に再現することができない。したがって、それらの挙動を再現できると考えられる離散要素法 (DEM) を用いて充填・排出特性をシミュレーションで解析する。NGH ペレットに関する実験は基本的に -10°C 程度の環境を必要とし、想定する NGH 輸送船は規模が大きいため、本研究におけるシミュレーションは実験に代わる重要な意味合いを持つ。

NGH 輸送・貯蔵システムへの離散要素法の応用にあたって、離散要素法における計算負荷が大きいという欠点を、主に 2 つの観点から考察することによって克服した。1 つは接触検索アルゴリズムの効率化、もう 1 つは時間刻みの大きい DEM の開発である。前者では、一般の DEM で用いられているセル法をより定量的に見直し、計算時間的に最適なセルの

区切り方を考察した。また、従来分子動力学法に適用されてきたリスト法に関し、接触力のみが作用する DEM ではリストの更新頻度が定義できず適用が困難であるとされてきた点に関し、リスト法をセル法と組み合わせセル幅に若干の余裕分を持たせることによってリストの更新頻度を少なくするという修正リスト法を提案し、3 倍～50 倍の高速化を実現した。後者では、DEM における積分アルゴリズムを見直し、接触力予測法と称する新規な方法を提案することによって、3 倍～8 倍の高速化を実現した。一連の DEM の高速化に関する考察によって、10 倍～400 倍の高速化を実現した。

ペレットの充填特性に関しては、エネルギー輸送効率の点から、容易にかつ可能な限り多く充填するという目的から、ペレットの自由落下によって充填率を大きくする条件に関して、DEM を用いたシミュレーションにより解析を行った。NGH ペレットの物性に関しては不明な点が多いため、DEM に必要なパラメータである反発係数および摩擦係数を実験により求めた。ペレットは充填率を向上させるために 2 成分系を想定しており、その容積比および粒径比に関する解析を行ったところ、容積比は細粒子容積比が 0.3 程度で最大充填率が得られることが確認された。また、粒径比は大きいほど大きい充填率が得られることが確認された。摩擦係数、バネ定数、反発係数が充填率に与える影響を解析したところ、摩擦係数が最も影響を及ぼすことが確認された。また、充填強度や充填層への衝突速度に関して充填率に与える影響を解析したところ、若干の影響はあるものの、摩擦係数ほどの影響はないことが確認された。したがって、充填率を向上させるには、摩擦係数を軽減させることが必要であることがわかったが、表面への物質のコーティング等では摩擦係数はそれ程軽減されないことが確認されており、充填率をより向上させるには自由落下以外の方法の提案が必要であることがわかった。

ペレットの排出特性に関しては、輸送船からの揚荷の際に容易にかつ安価にペレットを排出させたいという目的から、ペレットの流動特性を、DEM を用いたシミュレーションにより解析した。始めに、2 次元排出実験を行い、DEM がその挙動を再現していることを確認した。次に、ペレットの流動特性に大きな影響を及ぼすペレット間の固着について実験を行い、ペレットが荷重を受けてから十分に時間が経過した範囲では固着破断力は荷重の 0.8 倍に比例することと、固着面積はペレット間の換算径に比例することを確認した。また、DEM を固着性粒子に拡張するに当たり、従来の DEM における付着性粒子への拡張で用いられている付着モ

デルでは、付着面積を考慮しないために矛盾が生じる可能性があることを示し、固着面積を考慮した新規の固着モデルを開発し、3連結ペレットのせん断破断試験によってその妥当性を確認した。固着モデルを組み込んだDEMによるシミュレーションにより、現在想定している輸送船の仕様では、ペレットは強固に固着し、流動性は得られないことが確認された。

以上の充填排出特性を考慮して、容易、安価に、かつペレットの特性を活かした充填および排出特性の改善を目的として、NGH輸送・貯蔵システムへの壁面の利用を提案した。壁面の利用による効果は、船底ペレットへの圧力の軽減、壁面振動による充填率の向上および固着破断による流動性の確保の3点である。これらの特性についてDEMを用いたシミュレーションにより解析したところ、それぞれ効果があることが確認された。

本研究において得られたNGHペレットの基礎物性および充填・排出特性に関する以上の結果は、NGH輸送・貯蔵システムの確立に向けて、今後の研究および設計の方向性を示唆するものである。また、これらは、従来のDEMに関して、高速化、および固着性粒子への拡張の2点の改良を行った結果、可能となったものであると言える。