

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 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おり、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。本研究は、NGH 輸送・貯蔵システムの確立を目指し、離散要素法 (DEM) に種々の修正・改良を加えて NGH ペレットの充填・排出挙動のシミュレーションに適用し、NGH 輸送・貯蔵システムの研究に関する今後の方向性を示唆する結論を導いたものである。

本論文は全 7 章で構成されている。

第 1 章は序論で、国内外の天然ガスに関する動向をまとめ、NGH システムの確立の重要性と、本論文の構成について述べた。

第 2 章は NGH システムの概要として、NGH の基礎特性を述べると共に、NGH システムの研究の歴史が非常に浅いことなどから、これからの研究成果が期待される状況であることを述べた。また、NGH 輸送・貯蔵システムにおけるペレット式の位置付けとその有望性についてまとめた。

第 3 章では、DEM を NGH 輸送・貯蔵システムへ応用するに当たり、DEM の高速化を検討した。すなわち、接触検索アルゴリズムを効率化すると共に、大きい時間刻みに耐え得る DEM を開発した。接触検索アルゴリズムの効率化では、セル法の定量的見直しを行い、充填率および粒度分布が大きい場合には、検索範囲内のセル数を大きくした方が高速化されることを示した。また、セル法にリスト法を組み合わせ、セル幅に若干の余裕を与えることによりリスト更新頻度を少なくする修正リスト法を提案し、検索アルゴリズムを大幅に効率化した。修正リスト法を用いた DEM では、セル法の場合と比べて、接触検索の計算時間で 100~2000 倍、総計算時間で 3 倍~50 倍の高速化が達成された。大きい時間刻みに耐え得る DEM の開発では、粒子間の接触力を計算するアルゴリズムの改善として、2 体接触の段階における接触点ごとの接触力の予測値を使用する接触力予測法を提案した。多体接触が支配的である現象の例として充填および排出問題を取り上げ、接触力予測法では 3 倍~8 倍の高速化が実現できることを示した。両者の効果を合わせると、全体で 10 倍~400 倍の DEM の高速化に成功し、NGH 輸送・貯蔵システムへの応用に耐え得る計算速度を達成した。

第 4 章では、NGH ペレットの充填特性を検討した。まず、容積比および粒径比に関する検討では、粒径比が大きいほど充填率が大きくなることや、細粒子の容積比が 30% 付近で最大充填率が得られることを示した。次に、最大充填率が得られる条件で種々の因子が充

充填率に及ぼす影響を検討した。その結果、摩擦係数の影響が最も大きく、充填強度や衝突速度も影響するものの、その影響は小さいこと、また、ばね定数や反発係数の影響はほとんどないことを明らかにした。第4章では、NGHペレットの摩擦係数の測定も行っており、実験値0.3~0.8を得ている。NGHシステムの効率向上のため、できる限り大きい充填率を実現させることが不可欠であるが、そのためには種々の課題があることを確認した。

第5章では、NGHペレットの排出特性を検討した。まず、ペレット排出装置を用いてDEMの検証実験を行い、DEMがその挙動をよく再現していることを示した。次に、ペレットの排出特性で支配的になると予想される固着モデルを開発した。開発したモデルは、ノーテンションジョイントを外した付着モデルに角度に関する固着力の項が加わり固着面積を考慮したものとなっている。固着破断に関しては、引張りにより破断が起きると仮定したモデルを導入し、3連結ペレットのせん断試験によってその妥当性を確認した。固着力測定は引張破断力測定装置を用いて行い、付加荷重を受けてから十分時間が経過したときの固着破断力が付加荷重のおよそ0.8倍であることを明らかにした。実験値に基づき、固着モデルを組み込んだDEMを用いて2成分系の排出シミュレーションを行ったところ、現在想定している輸送船の仕様では固着力が非常に大きく、自重のみでペレットの排出を見込めるオーダーではないことが明らかになった。

第6章では、NGH輸送・貯蔵システムへの新たな提案として、壁面を利用したシステムを検討した。船倉内に適当な間隔で壁面を設けることによって、船底ペレットへの圧力の軽減が期待される他、壁面を振動させることによって充填率の向上および固着破断による排出が期待される。これら3点の効果についてDEMによるシミュレーションで検討した。圧力に関してはある程度軽減し、その結果、固着力もある程度軽減するが、良好な流動性をもたらすオーダーまでは期待できないことが確認された。また、充填率の向上および固着破断による排出に関しては、適当な条件で壁面を振動させることによって良好な結果が得られることが確認された。

第7章は結論として、本研究の成果をまとめた。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。