

審査の結果の要旨

氏名 岡屋克則

本研究は、天然ガスをハイドレート化して輸送するためのハンドリング技術についての検討をおこなっている。特に輸送船にペレット化した天然ガスハイドレート (NGH) を積載し、中近東もしくは東南アジアから日本に輸送する場合を想定し、積載量の増大、荷降ろしの高速化を意図した観点での条件設定および新規手法が中心課題となっている。

液化天然ガス (LNG) による輸送では、製造プラントの規模が小さくできないことから、中小ガス田の開発が困難であった。また LNG の極低温に耐える部材を必要とすることから輸送船や貯槽の建造コストは高くなるを得なかった。それに対して、NGH は小規模のプラントで製造できることや自己保存効果によって -20°C 程度での保存が可能であることにより、中小ガス田の開発が可能になり、輸送船の開発コストを引き下げることができる。

競合するエネルギー輸送技術としては、LNG の他にパイプラインによる輸送や、ガス生産地で発電をおこなって送電する方法や、高分子化して液化する方法などがあるが、コスト面などを総合すると NGH は小規模・短距離の輸送に適しているものと見込まれる。また安全性の面からも有利であり、ガス備蓄の手段としても有望であると考えられる。

NGH による輸送システムは Gudmundsson が 1996 年に試算をおこなったものであり、その実現のためには、NGH 製造装置、NGH ペレット製造装置、NGH 再ガス化装置の開発など克服されるべき課題も山積しているが、輸送船および港湾での NGH の積み下ろし装置の設計をするためのハンドリング技術についての研究が特に立ち遅れている。NGH を輸送する際の選択肢として、バルク輸送、スラリー輸送、ペレット化による輸送が考えられてきたが、最終的にペレット化が有望であるとの見方が定着してきている。そこで、NGH をペレット化して輸送することを前提として、ペレットの粒度分布、粒子形状を最適化するための検討が必要となっている。一方、ペレットが輸送船内で 10 日以上揺動を与えられ、圧密されることによってペレット層が固着する可能性があり、これに対する対処策が発見されなければならない。

本論文では、主として離散要素法 (DEM) を用いて、充填率を高めるための NGH ペレットの粒子径の組み合わせ、粒子形状の最適化について検討している。また、固着したペレット層を解砕するために鎖を用いた機構を提案しその可能性を探っている。論文の構成としては、最初に DEM の最適化をおこない、次に球形および非球形粒子による充填率についての検討、最後に鎖による固着層の解砕についての検討をおこなっている。

DEM については、大メッシュ法の最適化のロジックが示されている。その結果、細かい粒子が多数ある場合でも、比較的メッシュ数が少ない方が計算速度が速くなることが判明した。一方で、粒子に近接する粒子のみに着目し、ある程度離れている粒子に対する接触判定を先送りする遅延法 (Lazy Method) が提案され、その最適化と計算速度向上の予測方程式ができた。その結果、遅延法を用いれば、最適化された大セル法の 10 倍から 100 倍の処理速度を達成できることがわかった。なお高速化の程度に幅があるのは、遅延法では粒子の取り得る最高速度を仮定しなければならないためであって、今回のような充填のシミュレーションでは比較的低速の運動と見なされるので、100 倍前後の高速化が期待される。

充填特性についての成果の一つは、球形粒子を前提とした粒度 2 成分系の充填において、細かい粒子が入り込めず充填できない領域 (dead space) の概念を提案し、DEM によるシミュレーションによる解析に基づいた検討により、この領域が壁面効果と同等の粒子相互の関係によって引き起こされているものと説明された。これにより、実際の混合充填率とこれまでの論理的充填率との食い違いが明らかになり、今後の混合充填率の予測がたやすく行えるようになった。もう一つの成果は、非球形粒子の充填のシミュレーションで、レンズ型粒子のおよそ球形度 70%程度で充填率が最大になるとの見通しが得られた。2 次元粒子のシミュレーションでも円形度が高い粒子は充填率が高いという知見が得られているが、3 次元でこの傾向が確認できたのは初めてである。非球形粒子の多成分系については、形状の異なる粒子との組み合わせを考えれば、新たな可能性もあるものとみられている。

排出機構については、固着力測定から得られた所の固着 DEM モデルを用い、鎖を用いた排出補助機構の解析をおこなっている。提案する鎖構造は船倉内に 1m 程度の間隔で鎖を垂らし、それぞれの鎖を前後左右に横鎖で結びつけたもので、いわば鎖でできたジャングルジムのようなものである。このままの状態ではペレット充填をおこない、排出時点で縦鎖を引き下げて固着したペレット層を解砕するものである。DEM によって得られた結果は、実際にペレットを 4000 個製造して -30°C の実験室で固着・解砕・排出した実験結果とよく一致している。このことにより、鎖による解砕機構のシミュレーションの妥当性が保障され、他の条件でのシミュレーションが可能となった。なお、鎖自体は連続した粒子のモデルであり、鎖粒子間にはノーテンションジョイントおよび固着モデルが除外されている。重要な知見は、排出口の大きさによって解砕限界強度がことなることである。

これらの結果が NGH 輸送船の設計の一助となると考えられる。

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。