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

所 千晴

Chiharu Tokoro

1. 研究を始めた動機

天然ガスを人工的にハイドレート化し、天然ガスの輸送・貯蔵に利用する天然ガスハイドレート (NGH) 輸送・貯蔵システムは、従来の LNG システムを補完する新しいシステムとして近年注目を集めているが、これは 1995 年に Gudmundsson により提唱された比較的新しい概念であり、現段階ではまだシステムの確立には至っていない。本研究では特に NGH をペレット化して取り扱う方法に注目したが、NGH ペレットの多くの基礎特性が不明であった。また、NGH システムは大規模であり、 -20°C 程度の低温環境での実験を要するため、シミュレーションにより今後の NGH システムの研究・開発の方向性を示唆するような研究が望まれていた。

一方、NGH ペレット挙動が呈する粉粒体特有の非線形性を解析する方法としては、離散要素法 (DEM) が有望であると考えられたが、DEM は計算負荷が大きいという問題点を有し、本研究で必要な解析規模を満足させるものではなかった。そこで本研究では、種々の面より DEM の高速化に取り組み、NGH ペレット挙動の解析に十分な計算速度を達成した上で、特に NGH システムの根幹を成すと考えられる NGH ペレットの充填および排出特性を検討した。また、排出特性に関してはペレット間の固着特性が大きな影響を及ぼすため、DEM の固着性粒子への拡張にも取り組

んだ。

2. 研究遂行上困ったこと、感じたこと

本研究で対象とした NGH ペレットは、NGH を直径数十 mm の球形ペレットに成型したものであるが、他に類似の例がなく、摩擦、反発、固着特性等の基礎物性を実験的に把握するところから始める必要があった。実験は -20°C の低温室で行い、体調管理が重要であったことは勿論のこと、ビデオやデジカメ等の実験記録装置への低温対策が必要であった。また、ペレットの摩擦特性や固着特性は、環境や表面状態の微妙な違いによって大きく影響を受けるため、繰り返し実験を行うことが必要であり、実験に対する熟練と時間を要した。

DEM の高速化に関しては、画期的な方法がなかなか見つからず試行錯誤の期間が続いた。ペレット間の固着を考慮した解析では、必然的にペレット間の接触点数が多くなり、より計算負荷の大きい解析が必要となったことや、ペレット間の固着を機械的に破断して良好な流動性を得る方法を検証する解析では、より大規模で計算時間の長い解析に対する要望が高まったことなどから、DEM の高速化というテーマは、現段階では尽きることのない課題であることを強く感じた。

3. 主な研究成果

本研究は、大きく 2 つに分けることができる。1 つは DEM の高速化および固着性粒子への拡張を行った部分、もう 1 つは、改良した DEM に実験より得られた NGH ペレットの基礎物性を与えて充填および排出特性を検討し、その結果をふまえて NGH システムへの提案を行った部分である。以下にその成果の一部を紹介する。

3.1 DEM の改良

本研究では、DEM の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

2003 年 7 月 17 日受付
東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) TEL 03-5841-7077

< 著者紹介 >

平成 10 年早稲田大学理工学部資源工学科卒業、平成 12 年東京大学大学院工学系研究科地球システム工学修士課程修了、工学博士
専門：資源・エネルギー工学、粉体工学

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ついて、リスト法をセル法と組み合わせて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、9倍～400倍の高速化を実現した。

DEMの固着性粒子への拡張に関しては、固着面積を考慮した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。

3.2 NGHシステムに関する検討

ペレットの充填特性に関しては、輸送船に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により解析した。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、Fig. 1に示すように、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、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、パネ定数、反発係数や、充填強度、充填層への衝突速度がそれぞれ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することが確認された。

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により解析した。初めに、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、固着モデルを組み込んだDEM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

Fig. 1 Relation between Packing Ratio and Volume Ratio by 3D DEM Calculation : The Maximum Number of Pellets is 14, 724.

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。

4. この研究の応用分野と今後の展開

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り、これらの考察は、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。特に高速化に関しては、個々の粒子の運動方程式を解くというDEMの基本的性質に則した範囲内では、本研究により高速化の可能性に関して全体がほぼ網羅されたと考えている。本研究におけるNGHペレットの基礎特性および充填・排出特性の把握という観点からは、本研究において得られた高速化の範囲で有用な結果が得られたが、一般的には、DEMに対する高速化の要望は限らない。今後、DEMにおける解析規模をより拡大させるためには、計算の並列化や粒子挙動に関する何らかの相似則の発見、あるいは連続体モデルとの併用が必要になると考えられる。

なお、本研究の遂行にあたり、三井造船(株)および(株)三井造船船島研究所の関係者の方々に大変お世話になったことに心から謝意を表する。

(学位取得は2003年3月、東京大学)