

# 天然ガスハイドレートペレットの 充填と排出に関する研究

国立大学法人 東京大学大学院  
工学系研究科 地球システム工学専攻

岡屋克則



---

---

# 天然ガスハイドレートペレットの 充填と排出に関する研究

## 要 旨

ガソリンの驚異的な値上がりに代表される最近のエネルギー価格の高騰は、あらゆる産業に深刻な影響を及ぼしつつある。現在、年間原油 2.5 億キロリットル、LNG6000 万トンを入力している日本は長期的展望に立ってエネルギー政策を見直さなければならない時期に来ているといえる。一方で、北海道から沖縄に至る日本沿岸の海底にはメタンハイドレートが発見されており、これらについての採掘および輸送技術が確立されれば、日本のエネルギー戦略に資することは間違いない。

そこで課題となるのは天然ガスを輸送・貯蔵するシステムである。Gudmundsson が 1996 年に試算をおこなった天然ガスハイドレート(NGH:Natural Gas Hydrate)輸送システム(以後略して NGH システム)は小規模・短距離輸送に適した手段であり、大規模ガス田でしか採算の取れない現在の LNG(Liquid Natural Gas)システムと異なっている。したがって NGH システムを用いれば、現在未開発の中小規模ガス田をも開発可能になる。現在確認されている中小ガス田は埋蔵量で全体の 20%、ガス田数にして 80%にもものぼる。

NGH システムの利点は、NGH 生成装置が小規模であることだけでなく、NGH が常圧-20℃程度での保存が可能であるという自己保存特性にも由来する。これにより、極低温に耐える材料や、高圧に耐える構造を必要としないので輸送船や貯蔵タンクなどの製造コストが大幅に削減できる。したがって NGH 輸送船が期待されるのは、LNG 輸送船や CNG 輸送船と比べて造船費用が安いからである。

---

しかし、これは同時に NGH 輸送船に必要な NGH のハンドリング技術の確立を前提としなければならないことを意味する。すなわち、輸送船の設計ばかりではなく、NGH の製造、貯蔵、荷積み、輸送、荷揚げ、再ガス化、安全対策、国際法の整備に至るまでの一貫した流れを視野に入れた技術開発が必要となってきた。これらのいずれかが欠けてもシステム全体が挫折せざるを得なくなることは、過去の経験からも明らかである。同時に NGH システムは海底下の天然ガスハイドレート開発の後方支援をするという認識も重要である。

さて、前述のように NGH システムには製造、輸送、再ガス化のプロセスがあるが、このシステムの困難な要因の一つはハイドレートが固体であるという点にある。ガスや液体と異なって固体によるハンドリングには、付着・固着、凝集、閉塞、偏積などといった粉粒体特有の物性が関係している。今回想定している NGH システムにおいても、バラ積み、スラリ化、ブロック化などの案もあったが、現在のところペレット化によるハンドリングが最も有望であろうという前提で計画が進行中である。

本研究室では 2001 年からこの計画に関わり、ペレット化の実現性の検討に参加してきた。2003 年の所の博士論文で示したように、船倉への NGH ペレット充填を前提としてペレットの反発係数の影響が比較的少ないが、摩擦係数の影響は大きいこと、固着モデルによるシミュレーションによって通常のアーチブレーカなどの排出補助機構では円滑な排出が望めないことなどが分かってきた。この結果は、現在の輸送船設計のための重要な情報の一部となり、現時点での輸送船構想が成り立っている。

本報告では、MIT の報告にあった非球形粒子による充填率向上に可能性を求め、改めて粒子の充填特性についての検討をおこなうと同時に、鎖による解砕で固着したペレット層を流動化・排出する可能性について探った。これらは単に NGH 輸送船の積載能力を向上させるためだけではなく、輸送設計の前提となり、ひいては NGH システム全体の成否に関わる問題であると捉えている。

---

---

本研究の成果は、この種の研究を進めるのに有効な離散要素法 (DEM) の最適化の提案、充填率を向上させるためのアルゴリズムの提案および非球形粒子による充填率向上の確認、固着ペレット層を解砕するための鎖網の効果の確認である。

DEM については、長年のプログラミングの経験に基づいて、メッシュ法の中の大メッシュ法の最適化のロジックを示した。その結果、細かい粒子が多数あるにしても、大セル法では比較的メッシュ数が少ない方が計算速度を速めることがわかった。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) を提案し、その最適化と計算速度向上の予測方程式を作成した。その結果遅延法によれば、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。なお結果に幅があるのは、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すことができるので、100 倍前後の高速化を期待してもよい。

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できた。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。これについては以前におこなった2次元粒子のシミュレーションで、円形度が高い粒子の方は充填率が高いという知見を得ていたが、3次元で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検討中ではあるが、未だ成果が得られていない。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が、粒径比をあまり大きくしないという制約条件下では大幅な充填率向上は望めない。

---

---

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た。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と類似する。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(凝集・固着したものを振り解くこと)する。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 $-30^{\circ}\text{C}$ の実験室で固着・解砕・排出した実験結果とよく一致した。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り、今後の輸送船設計に役立つかもしれない。

NGH 輸送船の設計においては、万が一にも排出不能になることがあってはならないという見地から、実証されていないアイデアがいきなり実装されることはないと考えられる。現在の設計では、鉱石の荷揚げに用いられている掻き取り式のアンローダを、気密を確保した船倉内に設置し、排出をおこなうことになっている。ただし、この船が実際に稼働を開始すれば、本研究で提案している鎖方式の実証試験の空間をその一角に得られるかもしれない。本研究の実証試験はその時点から始まることになるだろう。

以上が本研究の要旨であり、この成果が NGH システムの実現に貢献できることを期待している。

---

---

# A Study on Filling and Discharge of Natural Gas Hydrate Pellet

## Abstract

The recent sudden rise of the energy price, maybe due to a marvelous price hike of gasoline, is deeply effecting for all industries. Japan that imports 2.5 million kiloliters of crude oil and 60 million tons of LNG a year should change the long-term strategy of the energy import.

The methane hydrate resource was discovered at the bottom of the sea in coastal regions from Hokkaido to Okinawa. Therefore, it is necessary to develop a system that can facilitate the transportation and storage of the natural gas. Natural gas hydrate (NGH) transportation system that Gudmundsson provisionally calculated in 1996 is a suitable mean for the small scale and the short distance transport. Though the LNG system is applicable to only large-scale gas fields, the NGH system enables the gas production of an undeveloped small or medium-scale gas fields. It should be noted that 80% are small or medium-scale gas fields, and only 20% are proven reserves.

The advantage of the NGH system is that the scale of the synthetic plant of NGH is small. Moreover, NGH is solid under 1 atm and  $-10^{\circ}\text{C}$  due to its self-preservation effect. Considering the above mentioned reasons, the material that can be endured at the extremely low temperature or high pressure is not necessary for the NGH system. Therefore, the manufacturing costs such as the transportation ships and storage tanks can be greatly reduced in the NGH system. The advantage of the NGH transportation by ship is that the shipbuilding cost is cheaper than the LNG or CNG transportation by ship. However, this means that there is a need for the development of a technology for handling and for the transportation of NGH by ship at the same time. In other words, a

エラー! 指定したスタイルは使われていません。 エラー! 指定したスタイルは使われてい  
ません。

---

---

series of technological development for the new NGH system are necessary. This would include the design of a new type of transportation by ship, manufacturing, storage, loading, unloading, and re-gasification, as well as measures for safety according to the international laws and so on. Considering the past experiences, the entire system can fail if even one of these requirements is lacking. In addition, the recognition that the NGH system supports the natural gas hydrate development from ocean is also important.

The NGH system includes the process of manufacturing, transportation, and the re-gasification. One of the main difficulties that such a system is facing is that the hydrate is solid. Some of the physical properties of the particle, such as the adhesion, clinging, cohesion, blocking, and segregation are related to handling of the solid. The handling methods such as bulk, slurry, block, and pellet were devised for the NGH transportation. This NGH system is based on the idea that handling by making into the pellet is the best option.

This laboratory joins this plan in 2001, and has participated in the research of the NGH pellets. Tokoro, in her dissertation defended in 2003, pointed out the following two points.

- 1) The restitution coefficient does not influence the packing fraction so much unlike the friction coefficient.
- 2) As a result of the simulation, the clinging pellets can not discharge from the hopper with an usual arch breaker.

These points are important, and the present NGH transportation by ship is designed based on these findings.

“Improving the Density of Jammed Disordered Packings Using Ellipsoids” reported from MIT has a new idea. In that report, the packing characteristic of the particle was examined again, and the possibility of the discharge system with the chain was also examined. This research concluded that not only the increase of the load of the NGH transportation by ship is useful but also the design of the entire NGH system is needed.



---

---

The achievements of this research are of the followings (1) the method of optimizing DEM, (2) the method of improving the packing fraction, (3) the method crushing the aggregated pellets.

Regarding the achievements for DEM, a new logic of the optimization of the large mesh method for DEM was shown. If the number of meshes is small, the calculation speed is fast when there are a lot of small particles. Then, the attention is paid to the particle that was adjacent to the particle, and a new Lazy Method that put off the contact judgment to the particle away has proposed. Moreover, the forecast equation of optimization and the calculation speed improvement of the Lazy Method have been established. As a result, the calculation speed was increased from 10 to 100 times. The calculation speed changes by the assumed maximum speed. The calculation speed will be about 100 times of the original case due to the very slow motion of the particles for this packing simulation.

Regarding the achievements for packing, the concept of dead space about the packing of two size system, where a small particle can not be filled, is proposed. From the results of DEM simulation, the dead space may be related to the gap in the vicinity of the wall. The difference between the actual packing fraction and logical packing fraction was clarified by this research; the packing fraction with two size system was able to forecast correctly result. As for the other result of the simulation regarding the filling of non-sphere particles, the packing fraction will be maximize in the case of about 70% roundness. It is the first time to confirm this in a three-dimension space. Even though non-sphere multi-element system is examined, the packing fraction will not grow any further because of the size ratio is small.

The discharge assistance mechanism with chains was analyzed using the DEM model developed by Tokoro. The proposed structure is such that the chains are hung down in the chamber of a ship, and each chain is tied together with horizontal chains. It is just the one like the jungle gym with chain. The aggregated pellets are broken when the chain that buries in the pellet is pulled down. The result of the DEM simulation are well explained by presenting a series of the experimental results that were carried out by

エラー! 指定したスタイルは使われていません。 エラー! 指定したスタイルは使われてい  
ません。

---

---

using 4000 pellets, keeping the room temperature at  $-30^{\circ}\text{C}$  As a result, the validity of the simulation of the breakage mechanism with the chain was verified, and the simulation under other conditions became possible. The model of chain is a series of particles, and the no-tension joint and the adfreezing model have been excluded between the chain particles. It is an important finding that the limit strength is depending on the size of the outlet hole. In addition, this finding might be useful for the design of the transportation by ship.

A new idea will not be used for the NGH ship until the certainty of discharge has been verified. The design of a present NGH ship is supposed to use the unloader unit in the airtight chamber. But, the chain unit will be available for the experiment when this ship will be in operation. The practicably useful of this research will be acknowledged in day after that.

This is the abstract of this research. I am expecting that this research will be useful for the sucess of the NGH system and its ship.