# NGH-FPS0 用オフローディング装置の開発

浮体動揺を再現した搬送模型試験

海洋開発研究領域 \*難波 康広、加藤 俊司、正信 聡太郎、佐藤 宏、岩井 勝美 三井造船(株) 高沖 達也、平井 一司、亀井 操、神田 雅光 (株)海洋工学研究所 佐尾 邦久 (財)日本海事協会 有馬 俊朗

## 1.はじめに

本論文標題にある NGH-FPSO とは、Natural Gas Hydrate - Floating Production Storage & Offloading system、すなわち海底ガス田から産出した天然ガ スをハイドレート化し、貯蔵・積出を行う浮体式 生産貯蔵積出設備のことである。

NGHは、水分子とガス分子からなる氷状の固体物質であり、資源そのものとして、また天然ガス輸送の一手段として注目されている。

本研究で対象とするのは後者であるが、天然ガ ス輸送形態の一つとして NGH が注目される理由 は、NGH が LNG に比べて比較的温和な条件(大気 圧下で-15 程度)で輸送できることから、LNG 輸 送のように、多額の初期設備投資を必要とせず、 従って将来中小ガス田を開発する際、優位な天然 ガス輸送手段となる可能性があるからである<sup>1)</sup>。

東南アジア、オセアニアは、このような中小ガ ス田が多く、しかもそれらのほとんどが海洋ガス 田であるため、生産と同時に洋上で NGH 化する ことが合理的である。

NGH-FPSO と従来の石油 FPSO とを比べた場合、 最も大きな違いは、生産・貯蔵・積出しされる対 象が、液体でなく氷状粉体であることである。特 にそのような氷状粉体のオフローディング技術の 開発が重要であり、これが NGH-FPSO 開発におけ る重要課題の一つとなっている。

そこで当所と三井造船(株)及び(株)海洋工学研 究所並びに(財)日本海事協会では、平成 15 年度か ら NGH-FPSO 用オフローディング装置の研究開 発を進めている。本研究の最終目標は、オフロー ディング装置及び NGH-FPSO の概念設計、技術・ 安全性評価を行い、オフローディング装置の開発 を行うことである。図-1 に本研究のフロー図を、 図-2にNGH-FPSOとNGH輸送船(以下シャトルと いう)のイメージ図を示す。



#### 図-1 研究開発フロー



図-2 NGH-FPSO とシャトルのイメージ図

平成 15 年度は、FPSO の検討ベースとなる海気 象条件等の設定、オフローディング装置及び NGH-FPSO の基本計画、FPSO 及びシャトルの動 揺を再現した機構模型による実験等を行った。

平成 16 年度は、風洞・水槽試験による、外力や 浮体動揺特性の評価、複合外力中における総合模 型試験とその結果に基づく数値計算プログラムの 検証、設定条件下での稼働率評価等を行う。また、 NGH-FPSOの概念設計、係留/係船システムの概念 設計を行う。

本論文では、図-1のフロー図のうち、平成 15 年度に行った、オフローディング機構模型実験に ついて報告する。

## 2.オフローディング装置試設計モデルと搬送対 象粉体

表-1 に、平成 15 年度の検討結果に基づいて設定された、FPSO とシャトルの主要目を、また図-3 に試設計されたオフローディング装置の外形図を示す。

NGH の荷姿については、パウダー、スラリー、 ペレット、ブロック等が考えられるが、荷役の効 率化、貨物の品質保証等の観点から、ペレット化 してばら積み貨物として海上輸送する方法が最も 効率が高く、実現性が高いとみられている<sup>2)</sup>。

そこで同装置は、写真-1のような NGH ペレッ トを搬送対象物とし、これを搬送する搬送装置と 同装置を支える構造部で構成されている。搬送装 置は FPSO の上甲板上の水平コンベア1から受け 渡される NGH ペレットを垂直に揚げる垂直コン ベア1と、上部に水平に設置した水平コンベア2 からなり、図のような構造により支持されている。 また、水平コンベア2の先端には FPSO とシャト ルとを接続した状態で2船体間の相対変位量を吸 収するために、蛇腹構造をもつ伸縮式のシュータ ーを取り付けることとした。シューター方式とし ては、ワイヤー式及びパンタグラフ式を検討した (図-3 は、パンタグラフ式の例)。

さらに、風、波、流れによる長周期ふれまわり 運動が予想されるため、オフローディング装置を 旋回できるよう旋回台を設置した。

また平成 15 年度の検討結果から、本研究では、 想定する実機 NGH ペレットの形状及び比重を、 それぞれ球形、0.8(均一比重)とし、ペレットは、 充填率を高める為に、大径ペレットと小径ペレッ トからなる混合ペレットとし、大径と小径の体積 比を 7:3、直径比を 5:1 から 15:1 と設定、さらに、 NGH の目標搬送量を 108,672 [ton/day] (135,840  $[m^3/day]) \ge bt_{\odot}$ 





図-3 オフローディング装置外形図



写真-1 NGH ペレット

#### 3.実験の概要

3.1 実験の目的

本実験の目的は、オフローディング装置模型を 製作し、NGH ペレットを模擬した粉体を用いて搬 送実験を行うことによって、下記項目の調査等を 行い、今後のオフローディング装置開発に有益な 情報を収集することである。

- a) 目標搬送量の確保
- b) 粉体搬送量及び充填率に対する浮体動
  揺・風の影響調査
- c) シューター構造の数値モデルの構築と、実 験による検証

3 . 2 実験の方法

まず写真-2 に示すように、図-3 の試設計モデル に対応する縮尺 1/30 の NGH-FPSO 用オフローデ ィング装置模型を製作した。



写真-2 オフローディング装置模型

同模型には、図-4 に示すように、トラス構造下 部にロール・ピッチ強制動揺装置、走行台車にサ ージ・ヒーブ強制動揺装置、シューター模型下端 にスウェー強制動揺装置の3台の強制動揺装置を 設置し、これらによってオフローディング装置及 びシャトル側シューター端部の、波浪中における 動揺を模擬した。また、3台の送風ファンによっ て、シューター模型に風を当て、強風時を模擬し た。写真-3に、シューター模型を示す。

計測項目は、計量タンク重量と、シューター上 部にかかる張力及び加速度である。

実験では、浮体動揺を模擬した場合と模擬しな い場合、シューターに風を当てた場合と当てない 場合とで、NGHペレット模擬粉体を実際に搬送し、 搬送量、充填率に対する風や動揺の影響を調査し た。



写真-3 パンタグラフ式(左)及びワイヤー 式(右)シューター模型

NGH ペレット模擬粉体としては、本実験では、 実機 NGH ペレットの比重、形状等を勘案し、大 径粉体としてプラスチック球の BB 弾(直径 6[mm]、 比重 1.14)を、中径粉体として植物種子の野沢菜 (直径 2[mm]、比重 1.24)を、小径粉体として植物 種子のポピー(直径 0.5[mm]、比重 1.27)を採用した。 写真-4 に NGH ペレット模擬粉体の写真を示す。



## 写真-4 NGH ペレット模擬粉体

実験の手順としては、図-4 に示すように、オフ ローディング機構模型の鉛直コンベアに払い出し タンクを、シューター下方に重量計付き計量タン クをセットし、払い出しタンクから混合粉体を送



図-4 オフローディング装置模型の概要と強制動揺装置配置図

り出して、各種コンベア、シューターを介して計 量タンクまで搬送した。図中の点線の矢印は、模 擬粉体の搬送経路である。この時払い出しタンク に用意する混合粉体の体積比は、事前の検討から 7:3となるように調整した。

これとは別に、シューターを曲げ剛性及び引張 り剛性を考慮した梁モデルで近似して、シュータ ー上下端を動揺時搬送試験を模擬した運動で強制 動揺させ、シューター上部に働く張力の計算値と 計測値を比較することによって、この数値モデル の検証を行った。

#### 3.3 実験条件

非動揺時の搬送試験では、表-2 に示すように、 2 種類のシューター方式に対し、大径と小径、中 径と小径の混合粉体の搬送を行った。

表-2	非動揺時搬送試験実験ケース
混合粉体	2種類(大径+小径、中径+小径)
シューター	2種類(ワイヤー式とパンタグラフ式)

動揺時を想定した搬送試験は、表-3のケースに 対して行った。ここで、想定海域の長期波浪デー タに基づき、設計条件である有義波高 4[m]に対す る波周期の最頻値と最大値を考慮して、スペクト ルピーク周期としてそれぞれ 9.8[s]、15.75[s]を設 定した。また、風を含む試験では設計条件(平均 風速 10[m/s])より厳しい平均風速 15[m/s]にて計 測を行った。

状態名	A-1	B-1	A-2	B-2	A'-1	B'-1	
混合粉体	2種類(大径+小径、中径+小径)						
シューター	2 種類 (ワイヤー式とパンタグラフ式)						
波スペクトル形	JONSWAP型(γ=3.3)						
有義波高(Full)	4[m]						
スペクトルビー							
ク周期(Full)	9.8[s]		15.7[s]		9.8[s]		
平均風速(Full)	0[r	n/s]	s] 0[n		15[m/s]		
相対位置関係	Α	В	А	В	Α	В	

表-3 動揺時搬送試験実験ケース

洋上動揺再現方法としては、上記波スペクトル と、表-1の FPSO とシャトルの波浪中応答関数か ら、それぞれ6自由度の不規則動揺時系列を求め、 両者の相対動揺信号(5自由度)に変換し、その 信号を強制動揺装置に与えることで洋上での動揺 を再現した。ただし、ここでは Yaw 角は固定値と した。なお、FPSO とシャトルとの相対位置関係 としては、FPSO、シャトルの波浪中応答を事前に 検討した結果、最も相対動揺が大きい図-5の2種 類の相対位置関係(A状態とB状態)を選択した。 また、風向は FPSO に対し常に 90°の方向とした。

洋上での動揺再現時の強制変位、回転運動のスペクトル例(B-1ケース)を図-6に示す。図中"目標値"は、目標の動揺スペクトルであり、"計測値"は実際に強制運動させた場合の結果である。



図-5 A 状態(上)と B 状態(下)における NGH-FPSO とシャトルの相対位置関係



図-6 洋上での動揺再現時の強制回転、変 位運動のスペクトル例(B-1 ケー ス;実機スケール)

#### 4.実験結果と考察

図-7、図-8 は、非動揺時と動揺時の搬送量の関 係をプロットしたものである。図-7 は A 状態、図 -8 は B 状態での実験結果である。表-4 に図-7~図 -10 に対する凡例を示す。但し、凡例中 W、P は それぞれワイヤー式、パンタグラフ式を表す。こ れらの結果から、非動揺時、動揺時共に、いずれ のシューター、混合粉体に対しても目標搬送量で ある 0.32 [ℓ/s]が満足されていることが分かる。ま た、全体的な傾向としては、中径+小径の混合粉体よりも、大径+小径の混合粉体のほうが、搬送量が大きい、ワイヤー式の方がパンタグラフ式よりも、動揺の有無に係わらず搬送量が大きい、ということが言える。

ワイヤー式の方がパンタグラフ式よりも搬送量 が大きい理由としては、写真-3の様に、ワイヤー 式は、上部では蛇腹の山谷が伸び、下部では縮ん でいて、山谷の間に粉体が詰まりにくかったのに 対し、パンタグラフ式では蛇腹の山谷の凹凸が保 たれているため、ここに粉体の目詰まりが起こっ て搬送量に悪影響を与えたものと思われる。

搬送量に対する浮体動揺の影響としては、基 本的には動揺は搬送量を減らす傾向にあると思 われる。ワイヤー式の場合には正にこの傾向が 見られるが、パンタグラフ式ではむしろ動揺時 のほうが搬送量が増える場合もある。これは、 動揺時にパンタグラフ式シューターの蛇腹の山 谷が伸びることで、目詰まりが解消されるため と思われる。

表-4 図-7~図-10 に対する凡例

휘문	シューター 古弌	混合粉体	Tolel	l l[m/e]
	W 1110		9.8	-
-	Ŵ	大 + 小	9.8	15
<u>ـ</u>	W	大+小	15.7	-
	Р	大+小	9.8	-
0	Р	大+小	9.8	15
Δ	Р	大+小	15.7	-
	W	中+小	9.8	-
•	W	中+小	9.8	15
▲	W	中+小	15.7	-
8	Р	中+小	9.8	-
Ð	Р	中+小	9.8	15
4	I P	甲+小	15.7	-



図-7 A 状態における搬送量への動揺の影響



図-8 B状態における搬送量への動揺の影響

図-9、図-10は、非動揺時と動揺時の充填率比(こ こでは、搬送前と後の充填率の比を充填率比と呼 ぶことにする)の関係をプロットしたものである。 図-9はA状態、図-10はB状態での実験結果であ る。全体的な傾向としては、動揺の有無に係わら ず、充填率はほとんどの場合で搬送前よりも後の 方が向上すること(充填率比が1より大)、しかし その向上の程度は、ワイヤー式の場合、動揺に よって減ってしまうが、逆にパンタグラフ式の 場合は増える場合もある、ということが言える。

の原因については、粒度偏析(種々の粒径の粒 子を混合したものが流動や振動の影響で粗いもの と細かいものに分離すること)の影響、の原因に ついては、動揺による蛇腹の山谷伸縮の影響が考 えられる。

最後に、シューター上端における張力について、 数値解析結果と計測結果を比較した一例を図-11 に示す。この図を含めた比較結果から、本研究で 構築したシューター挙動の解析モデルが有効であ ることを確認した。

なお、搬送量、充填率、シューター挙動に対し て風の影響はほとんどみられなかった。

#### 5.まとめ

オフローディング装置模型を製作し、NGHペレ ットを模擬した粉体を用いて搬送実験を行った。

オフローディング装置模型には、3 台の強制動 揺装置を設置し、これらによってオフローディン グ装置及びシャトル側シューター端部の、波浪中 における動揺を模擬した。



図-11 動揺時におけるシューター上端の張力 (ワイヤー式シューター、B'-1 ケー ス;実機スケール)

また、3 台の送風ファンによって、シューター 模型に風を当て、強風時を模擬した。実験は、浮 体動揺を模擬した場合と模擬しない場合、シュー ターに風を当てた場合と当てない場合とで行い、 NGH ペレット模擬粉体を実際に搬送し、搬送量、 充填率に対する風や動揺の影響を調査した。

またシューターを曲げ剛性及び引張り剛性を考 慮した梁モデルで近似し、シューター上下端を動 揺時搬送試験を模擬した運動で強制動揺させ、シ ューター上部に働く張力の計算値と計測値を比較

- することにより、この数値モデルの検証を行った。 結果を纏めると次の通りである。
- ・ 非動揺時、動揺時共に、いずれのシューター、
  混合粉体に対しても目標搬送量である 0.32
  [ℓ/s]を満足することが出来た。
- ワイヤー式の方がパンタグラフ式よりも、動 揺の有無に係わらず搬送量が大きい。これは、 パンタグラフ式シューターの蛇腹山谷に対す る粉体の目詰まりが原因と思われる。
- 搬送量に対する浮体動揺の影響としては、基本的には動揺は搬送量を減らす傾向にあるが、 パンタグラフ式ではむしろ動揺時のほうが搬送量が増える場合もある。これは、パンタグ ラフ式シューターの蛇腹山谷の伸縮による目 詰まり解消が原因と思われる。
- ワイヤー式シューターでは、動揺による搬送
  後充填率の減少が見られるが、パンタグラフ
  式ではむしろ向上する場合もある。これも動
  揺による蛇腹の伸縮が原因として考えられる。
- 搬送量、充填率、シューター挙動に対して風の影響はほとんどみられなかった。
- 本研究で構築したシューター挙動の解析モデ ルが有効であることを確認した。

#### 謝辞

本研究は、競艇公益資金により日本財団の援 助を受けて、(財)シップ・アンド・オーシャ ン財団が行う技術開発基金による補助金を受 け、実施したものであることをここに記し、謝 意を表します。

#### 参考文献

- 高沖 達也:NGH による天然ガスの海上 輸送、日本造船学会誌、第 878 号、 pp.21-24、2004
- 2) 亀井 操:NGH ペレット輸送船の貨物倉
  システムと荷役システム、国際フォーラム
  ム 天然ガスハイドレートペレット輸送船
  船 発表概要資料、2004