

10 複合環境条件下でのオフローディング装置の稼働性評価

海洋開発研究領域

三井造船(株)

(株)海洋工学研究所

(財)日本海事協会

* 正信 聡太郎, 浅沼 貴之, 加藤 俊司,

佐藤 宏, 岩井 勝美

高沖 達也, 平井 一司, 亀井 操, 神田 雅光

佐尾 邦久

有馬 俊朗, 浦口 能充

1. はじめに

近年, 海洋中小ガス田開発において NGH-FPSO が注目されている。NGH-FPSO で生産・貯蔵・払出しされる対象は氷状粉体であるため, 氷状粉体のオフローディング技術の開発が重要課題の一つになっている。本研究では, タレット係留された NGH-FPSO, 及びそれにオフローディング装置と係船装置を介して接続されたシャトルを対象とし, 複合環境条件下での総合模型試験を行い, オフローディング装置のシューター変位, シャトルの振れ回り量を計測した。更に, 設定条件下におけるオフローディング装置の稼働性能を評価した。その結果の一部を報告する。

2. 総合模型試験

2. 1 試験方法

写真 1 に複合環境条件下(波, 風, 潮流)での総合模型試験時の試験状態を示す。模型縮尺は 1/150 であり, 水深は 1.5m で行った。

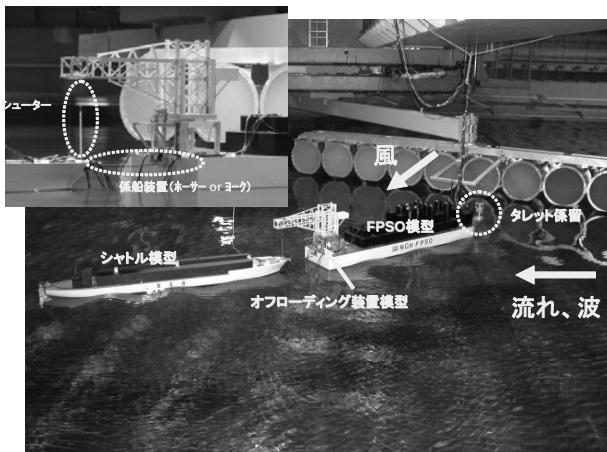


写真 1 総合模型試験

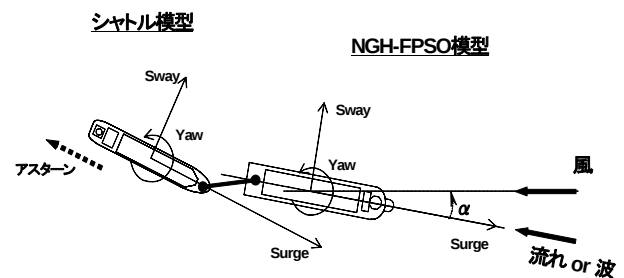


図 1 出会角の定義

波スペクトルは JONSWAP 型とし, 有義波高は 2.67cm (実機 4.0m), スペクトルピーク周期は 0.81 (実機 9.9 秒), 0.99 (12.1), 1.168(14.3), 1.35(16.5) 秒までの 4 種類, 流速は 0.1m/sec (実機 2 ノット), 風速は 1.22m/sec (実機 15m/sec) とした。環境外力との出会角の定義を図 1 に示す。波向, 流向は一方方向 (0°) であり, 風向は, 台車に固定された風発生装置により α を 0° から 60° まで変化させた。FPSO とシャトルを接続する係船装置としてヨークとホーサーの 2 種類の方式についてそれぞれ同一の試験を実施した。ホーサー係船装置の場合は, シャトルに後方推力を与えるためにアスターン模擬装置を使用した。試験の詳細は, 参考文献[1]を参照されたい。

2. 2 試験結果

複合環境条件下でのオフローディング装置シューター変位の応答スペクトルの一例を図 2~3 に示す。図はいずれも, パワーが最も大きいスペクトルピーク周期 1.35 秒 (実機 16.5 秒) の結果である。

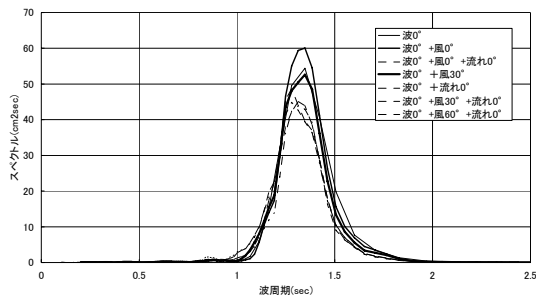


図2 シューター変位の応答スペクトル
(ヨーク係船方式)

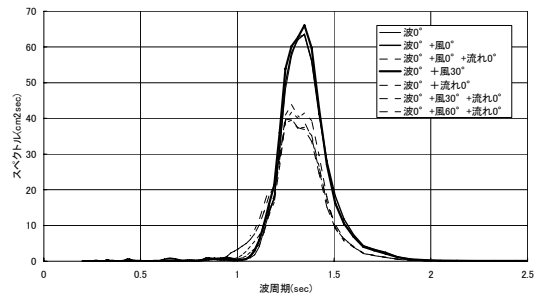


図3 シューター変位の応答スペクトル
(ホーサー係船方式)

同一の波スペクトルに対しヨーク係船装置の方がホーサー係船装置に比べてスペクトルピーク値が若干小さい。又、今回の実験の範囲内において波0°+風30°の場合がパワー的には最も大きいことがわかる。

そこで、波0°+風30°の波周波数動揺に関し、実験スペクトルの周波数解析により求めた応答関数のRAOと数値計算により求めた結果の比較を図4～8に示す。結果はホーサー係船方式の場合であり、数値計算はFPSO及びシャトルの振り回り平衡位置²⁾における出会角に対し、線形理論を適用して実施した。数値計算プログラムとしては、当所で開発した高次面境界要素法に基づく解析プログラム³⁾を使用した。計算に使用した要素は8点アイソパラメトリック要素であり、要素数はFPSOの場合1170(節点数3792)、シャトルの場合858(節点数2804)である。

実験結果と数値計算結果は良く一致しており、平衡位置を適切に評価すれば、線形理論にて波周波数応答を予測出来ることがわかる。

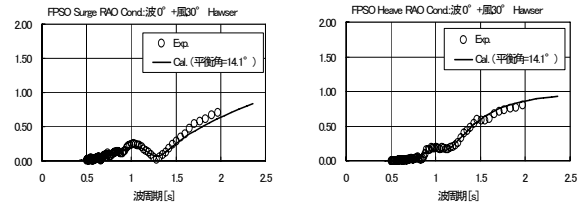


図4 FPSOの動揺特性(サージ, ヒープ)

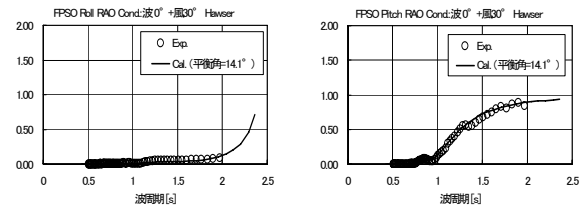


図5 FPSOの動揺特性(ロール, ピッチ)

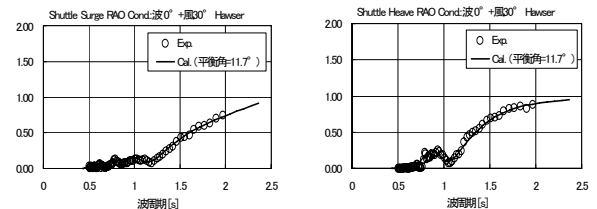


図6 シャトルの動揺特性(サージ, ヒープ)

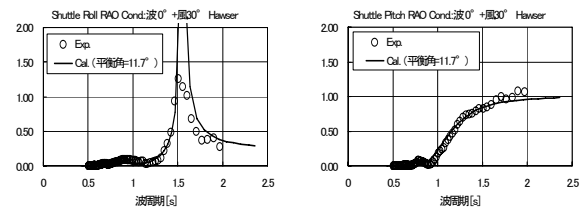


図7 シャトルの動揺特性(ロール, ピッチ)

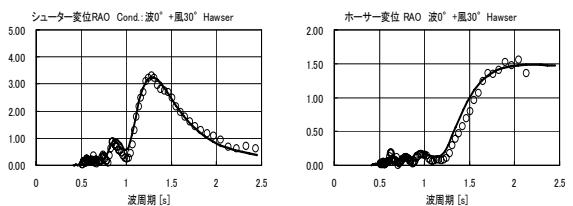


図8 FPSOとシャトルの動揺特性(シューター変位, ホーサー変位)

3. オフローディング装置の稼働性評価

以上の結果を踏まえ、設定条件下でのオフローディング装置の稼働性評価を行う。

オフローディング装置の動揺許容値は、次の通り設定されている⁴⁾。

- シューター変位量：18m
- 船体傾斜：5deg
- 長周期相対水平変位：7m

3. 1 シューター変位に関する稼働率評価

シューター変位に対するオフローディング装置の稼働率を以下の線形短期予測手法で算出した。

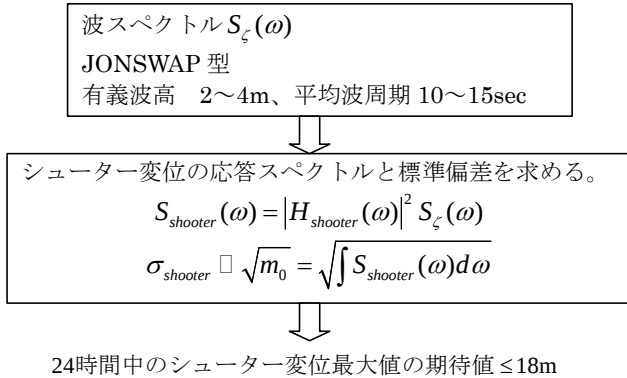


図 9 シューター変位に対する稼働率算出フロー

但し、24 時間中のシューター変位の最大値の期待値は次式から求める。

$$E[h_{\text{max}}^{\text{shooter}}] = \frac{\sqrt{2\ln N_{24h}}}{2} h_{1/3} = 2\sigma_{\text{shooter}} \sqrt{2\ln N_{24h}} \quad (1)$$

ここで、 N_{24h} は 1 日 (24×60×60 秒) を平均波周期で割った波の数である。

このようにして求めたシューター変位の有義値と最大値の期待値を表 1 に示す。シューター変位の最大値の (24 時間中) 期待値が許容値 18m を超えるのは、有義波高 4m で平均波周期が 13~15 秒の間である。設定海域の長期波浪頻度表で表すと表 2 のようになり、波高 4m 以下の条件において斜線部が稼働出来ない範囲になる。以上より、波高 4m 以下の条件に対して稼働率は 99.6% であることがわかる。

表 1 シューター変位の有義値と (24 時間中) 最大値の期待値

平均波周期 [s]		10	11	12	13	14	15
波 高 [m]	2	$h_{1/3}$	2.040	2.857	3.979	4.846	5.183
		h_{max}	4.344	6.049	8.385	10.166	10.595
	3	$h_{1/3}$	3.061	5.968	5.968	7.269	7.775
		h_{max}	6.516	12.638	12.577	15.249	16.242
4	[m]	$h_{1/3}$	4.081	5.713	7.957	9.692	10.367
		h_{max}	8.687	12.099	16.769	20.333	21.656

表 2 設置海域におけるシューター変位に関する稼働範囲

平均波周期 [s]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
有 義 波 高 [m]	1	317	683	418	456	455	241	77	17	3	0	0
	2	37	221	270	316	441	371	186	63	16	3	1
	3	11	106	173	213	370	410	267	114	36	9	2
	4	1	17	45	137	384	547	433	220	80	23	5

3. 2 船体横揺れに対する稼働率評価

次に船体横揺れ (ロール) に対するオフローディング装置の稼働率を以下の手法で算出した。

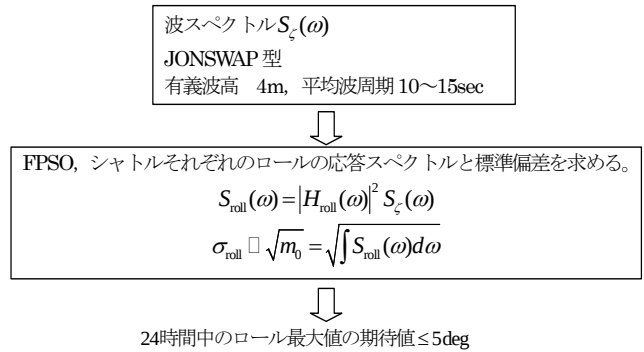


図 10 船体横揺れに対する稼働率算出フロー

但し、24 時間中の横揺れの最大値の期待値は次式から求める。

$$E[\phi_{\text{max}}^{\text{roll}} + \bar{\phi}] = \frac{\sqrt{2\ln N_{24h}}}{4} \phi_{1/3} + \bar{\phi} = \sigma_{\text{roll}} \sqrt{2\ln N_{24h}} + \bar{\phi} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\phi}$ は横揺れの定常成分である。

このようにして求めた定常傾斜を含む横揺れの最大値の期待値を表 3 に示す。表中の数値は、「波向 0°, 風向 0°, 流向 0°」, 「波向 0°, 風向 30°, 流向 0°」, 「波向 0°, 風向 60°, 流向 0°」における最大値を示しており、 $\bar{\phi}$ は実験値を用いた。長周期側でシャトルの横揺れが厳しいが、横揺れの最大値の (24 時間中) 期待値が許容値 5deg を超えることはなく、有義波高 4m 以下の条件に対して稼働率は 100% である。

表 3 船体横揺れの (24 時間中) 最大値の期待値

FPSO						
平均波周期 [s]	10	11	12	13	14	15
ヨーク	0.719	0.848	0.808	0.768	0.879	0.987
ホーサー	0.385	0.432	0.420	0.407	0.475	0.540
シャトル						
平均波周期 [s]	10	11	12	13	14	15
ヨーク	0.559	0.918	1.529	2.260	3.169	4.456
ホーサー	0.418	0.671	1.186	1.802	2.528	3.565

3. 3 長周期振れ回りに対する稼働率評価

オフローディング装置には、FPSO-シャトル間の相対回転変位を考慮した旋回台が設置されているため、長周期振れ回りによる回転変位は吸収出来ると考えられる。そこで、図 11 に示すようなオフローディング装置長さ方向の水平方向相対変位の長周期成分について調査した。結果を表 4 に示す。ここで、最大値は 24 時間中の平衡位置からの最大値の期待値を示しており、次式から求めた。

$$E[R_{\max}] = \sigma_R \sqrt{2 \ln N_{24h}} \quad (3)$$

σ_R は振れ回りの標準偏差であり、 N_{24h} は 1 日 (24×60×60 秒) をシャトルのサージの固有周期で割った波の数である。

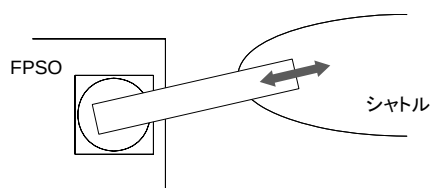


図 11 オフローディング装置長さ方向の水平方向相対変位の定義

表 4 長周期振れ回りによる水平方向変位

		平均波周期				
		7	9	11	13	15
標準偏差 [m]	ヨーク	1.9	1.7	1.3	1.8	1.5
	ホーサー	1.7	2.0	1.8	1.4	3.1
最大値 [m]	ヨーク	6.2	5.5	4.3	5.8	4.7
	ホーサー	5.6	6.4	6.0	4.6	10.2

表 5 設置海域における長周期振れ回りに関する稼働範囲 (ホーサー係船方式)

平均波周期 [s]	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
有義波高 [m]	1	317	683	418	456	455	241	77	17	3	0	0
	2	37	221	270	316	441	371	186	63	16	3	1
	3	11	106	173	213	370	410	267	114	36	9	2
	4	1	17	45	137	384	547	433	220	80	23	5

表中の数値は、「波向 0°, 風向 0°, 流向 0°」, 「波向 0°, 風向 30°, 流向 0°」, 「波向 0°, 風向 60°, 流向 0°」における最大値を示しているが、すべて「波向 0°, 風向 0°, 流向 0°」の場合であり、複合外力が同一方向から作用する場合に長周期変位量が大きくなっている。

ホーサー係船方式の場合、平均波周期 15 秒において許容値 7m を超える。これを設定海域の長期波浪頻度表で表すと表 5 のようになる (試験を行っていない周期については、線形補間によって求めた)。したがって、稼働率は 99.9% となり、稼働

性に関してシューター変位に対する要件の方が厳しい。一方、ヨーク係船方式の場合はすべての周期で許容値 7m 以下であり、稼働率は 100% となる。

4. おわりに

オフローディング装置の稼働性に最も影響を与えているのはシューター変位であり、設定条件下でのオフローディング装置の稼働率は 99.6% となった。したがって、出荷の頻度を 10 日に 1 回 (2 日の予備日を考慮) とすると、出荷出来ない確率は 0.04%、すなわち、1 年に 0.15 日間出荷出来ない日があることになる。

又、長周期振れ回りに関して、複合外力が同一方向から作用する場合に振れ回り量が大きい。ホーサーの場合は設定条件下での稼働率 100% を満足することが出来なかったが、ヨーク式だと稼働率は 100% であった。

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、海洋政策研究財団が行う技術開発基金による補助金を受け、実施され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

- 1) 佐藤宏他：NGH-FPSO に関する風洞・水槽実験，第 5 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集，2005 年 6 月 (掲載予定)
- 2) 浅沼貴之他：FPSO とシャトルタンカーに作用する複合環境外力推定法に関する研究，第 5 回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集，2005 年 6 月 (掲載予定)
- 3) 加藤俊司他：高次面境界要素法による FPSO 波力，流体力，動揺計算プログラム (著作権登録番号 P 第 7704 号-1)，2003 年 10 月
- 4) 三井造船株式会社：NGH-FPSO (天然ガスハイドレート洋上生産設備) の開発ーオフローディング装置の開発ー，平成 16 年度研究開発報告書，2005 年