

11 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

海洋開発研究領域

三井造船(株)

(財)日本海事協会

(株)海洋工学研究所

* 浅沼 貴之, 正信 聡太郎, 加藤 俊司,

難波 康広, 佐藤 宏, 岩井 勝美

高沖 達也, 平井 一司, 亀井 操, 神田 雅光

有馬 俊朗, 浦口 能充

佐尾 邦久

1. はじめに

海洋油田開発で高い実績を持つFPSO(Floating, Production, Storage and Offloading System)は、新たに海洋ガス開発でも注目される存在になっている。著者らは、天然ガスFPSOの実現の為に様々な研究を行っている¹⁾²⁾³⁾。本論文では、タレット係留されたFPSOと、それにタンデム係留されたシャトルタンカー（以下、シャトル）に作用する複合環境外力について述べる。FPSOからシャトルへのオフローディングの稼働性・安全性を評価する為には、複合環境下での2浮体の平衡状態、及び振れ回り運動を含めた挙動推定技術が必要であり、その上で2浮体に作用する複合環境外力の推定は必須である。

FPSO 及び FPSO に係留されたシャトルの挙動推定に関する研究は、海洋油田開発を背景に盛んに行われてきた。しかしながら、2浮体の相互干渉影響を考慮した風力、潮流力、波力の詳細な検討は充分なされていない。干渉影響を考慮しないそれぞれ単体での外力値を用いて挙動推定等を行い、設計上安全側の見積もりとされてきた。

Buchnerら⁴⁾は、シャトルの船体を船首、中央、船尾の3つのセグメントに分割し、タンデム係留状態に於ける各部に作用する風力を風洞実験で計測し、各部で後流影響の強さが異なることを示した。FPSOの遮蔽影響を考慮した、シャトルへ作用する風力の推定が重要であるとしているが、計測データも少なく、又シャトル全体へ作用する風力を見積もるまでには至っていない。Fucatuら⁵⁾は、

潮流に於けるFPSOの遮蔽影響を、水槽実験とCFD(Computational Fluid Dynamics)の計算結果を用いて検討し、遮蔽影響を考慮した際のシャトルの振れ回り運動は、考慮しないそれと比べて小さくなることを示している。しかしながら、CFDで潮流力を推定することは船体単体でも困難であり、後流影響を含んだ潮流力推定となると、精度は疑わしく、CFDの中に不確かなパラメータが多く含まれていると思われる。

以上を背景に、著者らは FPSO とシャトルに作用する複合環境外力について、風洞・水槽実験を基に詳細な検討を行った。

2. 想定モデル

本研究では、NGH(Natural Gas Hydrate)-FPSO とシャトルを想定した。NGHが天然ガスの輸送媒体化技術として注目される理由は、LNG(Liquefied Natural Gas)に比べて比較的温和な条件下で輸送出来る⁶⁾為であり、シャトルを含めた輸送及び再ガス化のトータルコストとして、優位な手段となる可能性が高いとみられている。



図1 NGH-FPSO とシャトル

表 1 NGH-FPSO とシャトルの諸元

	実機	風洞実験 (1/170)	水槽実験 (1/150)
	FPSO		
L [m]	300.0	1.765	2.00
Lpp [m]	300.0	1.765	2.00
B [m]	60.0	0.353	0.40
D [m]	33.0	/	0.22
d [m]	16.0		0.11
A _T [m ²]	3495.0	0.116	/
A _L [m ²]	14219.0	0.484	
H _L [m]	47.4	0.274	
シャトル			
L [m]	305.0	1.794	1.794
Lpp [m]	285.0	1.676	1.900
B [m]	46.0	0.270	0.310
D [m]	24.5	/	0.160
d [m]	14.5		0.100
A _T [m ²]	1481.0	0.053	/
A _L [m ²]	8171.0	0.289	
H _L [m]	26.8	0.161	

NGH-FPSOとシャトルのイメージを図 1、本研究で想定するNGH-FPSOとシャトルの諸元を表 1 にそれぞれ示す。表 1 の中の記号は、L: 全長、Lpp: 垂線間長、B: 幅、D: 深さ、d: 喫水、A_T: 正面面積、A_L: 側面積、H_L: 代表高さを指す。ここで代表高さH_Lは、風力を扱うときに使用するもので、 $H_L=A_L/L$ にて決定されるものである。

3. 風洞実験

風洞実験は、当研究所の変動風水洞(長さ 15m, 幅 3m, 高さ 2m)で行った。FPSO 模型は 6 分力計を介して変動風水洞備え付けのターンテーブルに、シャトル模型は 3 分力計を介し簡易ターンテーブルにセットした。それぞれのターンテーブルを回転させ、風向 α , β を変えて風力を計測した。風洞実験での座標系を図 2 に示す。図 2 の中にある座標値は実機スケールで記述し、括弧中に模型スケールで示した。実験条件を表 2 に、FPSO-シャトル模型の模型写真を写真 1 示す。

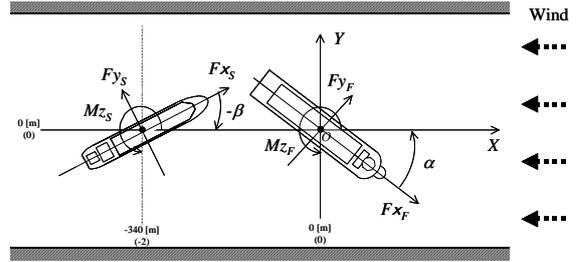


図 2 座標系



写真 1 FPSO-シャトル模型写真

表 2 実験条件

風向 α (deg.)	0,15,30,45
風向 β - α (deg.)	0, ± 15 , ± 30 , ± 45 , ± 60
風速 (m/sec)	5,10,15

FPSO の風力については、単独の場合とシャトルと連成の場合とでは大きく異なることは既に知られていることなので、シャトルの結果について述べる。図 3~5 に、前後力、横力、回頭モーメントを示す。風力の無次元化は次のように行っている。

- ・前後力係数 : $C_x = F_x / (1/2 \rho V_{10}^2 A_T)$
 - ・横力係数 : $C_y = F_y / (1/2 \rho V_{10}^2 A_L)$
 - ・回頭モーメント係数 : $C_M = M_z / (1/2 \rho V_{10}^2 A_L L_{pp})$
- 但し、 F_x, F_y, F_z はそれぞれ前後力、横力、回頭モーメント、 ρ は空気の密度、 V_{10} は実機高さ 10mでの風速を示す。

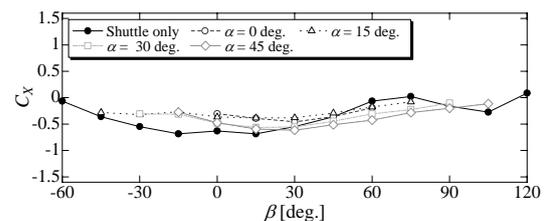


図 3 シャトルの前後力係数

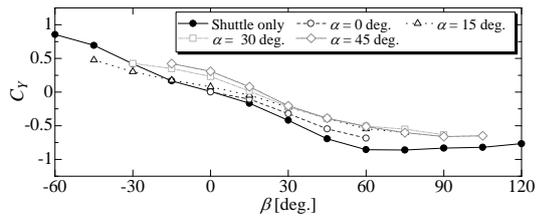


図4 シャトルの横力係数

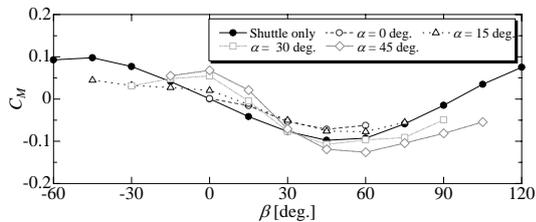


図5 シャトルの回頭モーメント係数

結果から、FPSOの遮蔽影響を受けシャトルに作用する風力は、単体と比べて定性的にも定量的にも説明出来ないことが確認出来る。FPSOの遮蔽影響は大きく、シャトルに作用する風力を推定する為には、何らかの方法で遮蔽影響を考慮する必要がある。図3~5の中で特徴的なことは、 $\beta=0\text{deg.}$ の場合においても $\alpha=0\text{deg.}$ のケース以外は、横力、回頭モーメントの値が0にならないことだ。これはFPSOの存在で風の流が乱され、シャトルに対して流入角がついていることを説明している。そこで、FPSO後方の風場がどのような状態になっているのかを詳細に把握する為、FPSO背後の風速分布を計測した。図6に、FPSOの角度 $\alpha=15\text{deg.}$ での風速のベクトル図と風向コンター図を示す。これは模型スケールで高さ $z=10\text{cm}$ の風場状態であり、矢印のサイズは風速 $V_{z=10\text{cm}}$ を、境界層の影響の無い底面から十分な高さでの風速 V_{inf} で除した $V_{z=10\text{cm}}/V_{\text{inf}}$ の大きさを示している。やはりFPSOの真後ろは風速が遅くなり、流入角が大きく、シャトルに風が流入角を伴って作用している様子が分かる。

著者らは、シャトル単体の風力と、FPSO背後の後流の速度分布を用いた、シャトルへ作用する風力推定法を既に開発している⁷⁾。それを用いて推定した結果を図7に示すが、非常に良く特性を説明していることが分かる。

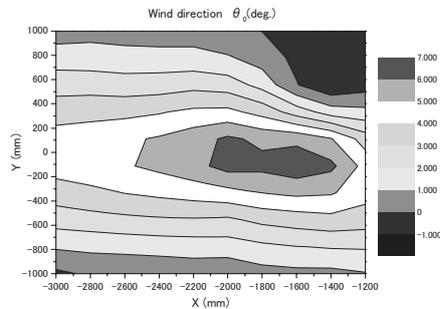
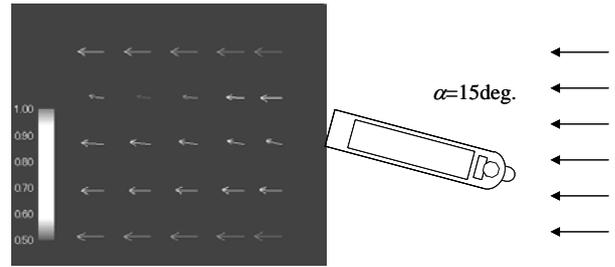


図6 FPSO後方の風場特性

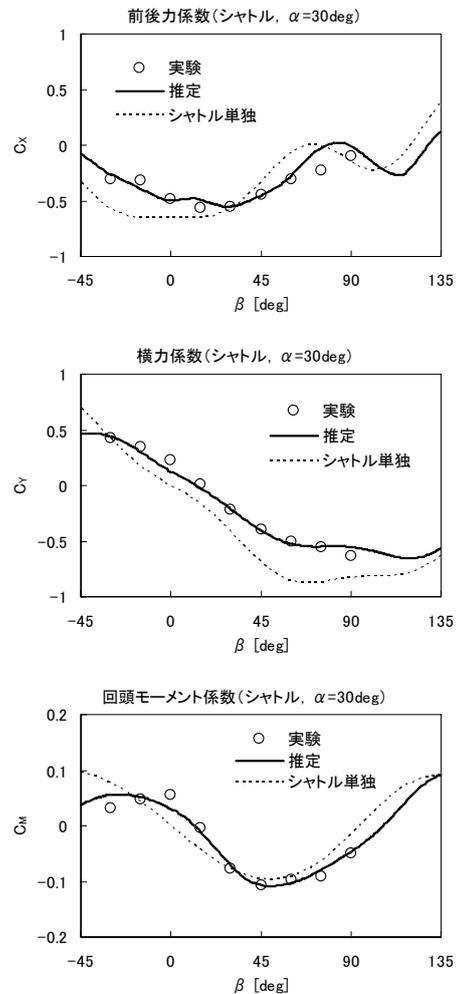


図7 シャトルの風力特性 (シャトル単独, $\alpha=30\text{deg.}$ のFPSOと連成, 推定結果の比較)

4. 水槽実験

4.1 潮流力実験

実験は当研究所の海洋構造物試験水槽（長さ40m, 幅27m, 実験時水深1.8m）で行った。潮流力は、FPSO 模型とシャトル模型を曳航させることで計測した。先に述べたが、既存の研究で、FPSO の遮蔽影響によってシャトルに作用する潮流力に影響を及ぼすことが報告されている。又、前節で、風力について説明した。そこで、風力と同様に潮流力についても説明する。

まず、図8に力と外力に対する角度を定義し、写真2に水槽実験の様子を示す。尚、FPSO とシャトルの中心間距離は2.3m（模型スケール）とした。実験条件は表3に示すケースで行った。図9～11に、シャトル単独での潮流力計測結果、及びFPSO と連成時の潮流力計測結果を示す。

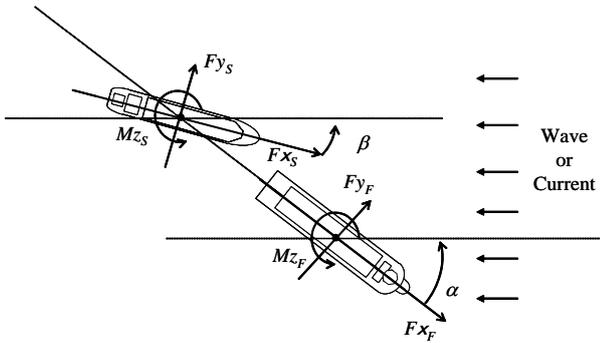


図8 FPSO とシャトルの位置関係

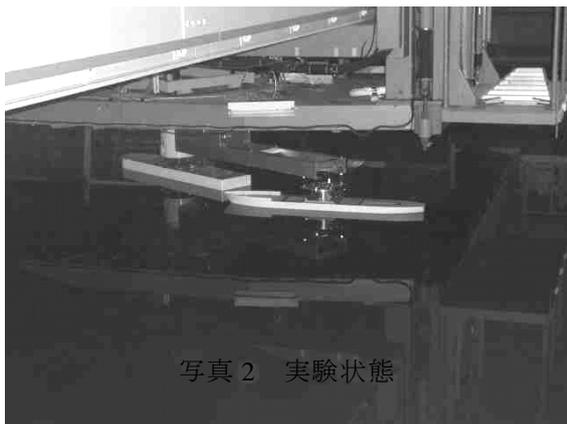


写真2 実験状態

表3 実験条件

潮流角 α (deg.)	0, 30, 60
潮流角 $\beta - \alpha$ (deg.)	0, ± 30 , ± 60
流速 (m/sec)	0.1, 0.2

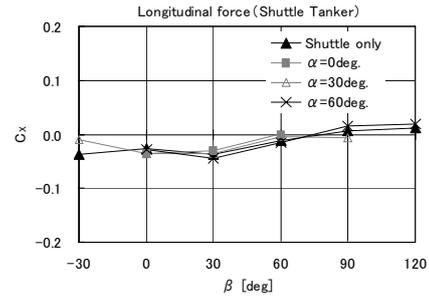


図9 シャトルの前後力係数

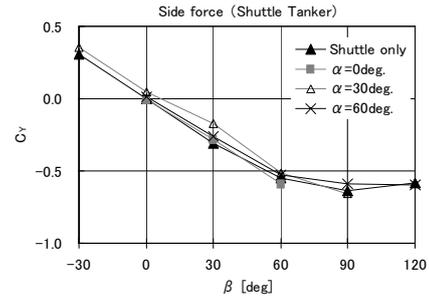


図10 シャトルの横力係数

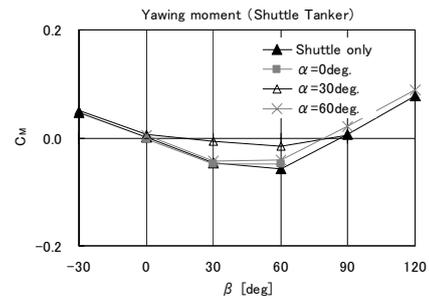


図11 シャトルの回頭モーメント係数

無次元化は次式で行った。

- 前後力係数 : $C_x = F_x / (1/2 \rho V_c^2 L_{pp} d)$
- 横力係数 : $C_y = F_y / (1/2 \rho V_c^2 L_{pp} d)$
- 回頭モーメント係数 : $C_m = M_z / (1/2 \rho V_c^2 L_{pp} d^2)$

V_c は流速、 ρ は水の密度である。

FPSO の遮蔽影響によって、シャトルに作用する潮流力が単独値と異なることが確認出来る。特に $\alpha=30\text{deg.}$ の場合、他のケースよりも単独値と差が出る結果となった。これは、FPSO に対して後方延長線上にシャトルの重心位置がある為、FPSO の角度 α が大きくなれば逆に遮蔽影響を受けにくい状態になることから、 $\alpha=60\text{deg.}$ では単独値と差が出なかったと考えられる。更に言えば、 $\alpha=30\text{deg.}$ のような状態が2浮体の挙動を想定すると実際に有り得る状態であるから、遮蔽影響の考慮が必要であると言える。

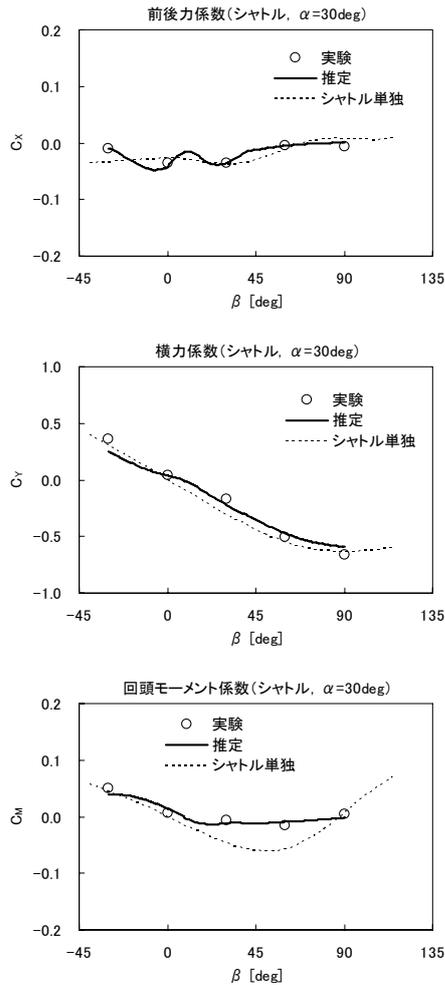


図12 シャトルの潮流力特性（シャトル単独， $\alpha=30\text{deg}$ のFPSOと連成，推定結果の比較）

風力の場合と同様に，FPSO後方の流速を計測し，著者らが開発したFPSOの遮蔽影響を考慮したシャトルに作用する潮流力推定法⁷⁾により確認を行った。図12に推定結果と実験値との比較を示した。

4.2 波力実験

潮流力実験と同様に，波力実験は当研究所の海洋構造物試験水槽（長さ40m，幅27m，実験時水深1.8m）で行った。計算は，当研究所で開発した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⁸⁾を使用し，実験値との比較を行った。FPSOとシャトルの位置関係は図8に示す通り潮流の場合と同様であり，表4には実験条件を示す。

表4 実験条件（規則波）

波の入射角 α (deg.)	0, 30, 60
波の入射角 $\beta - \alpha$ (deg.)	0, ± 30 , ± 60
波高 (cm)	2.2
波周期 (sec)	0.5 ~ 2.4

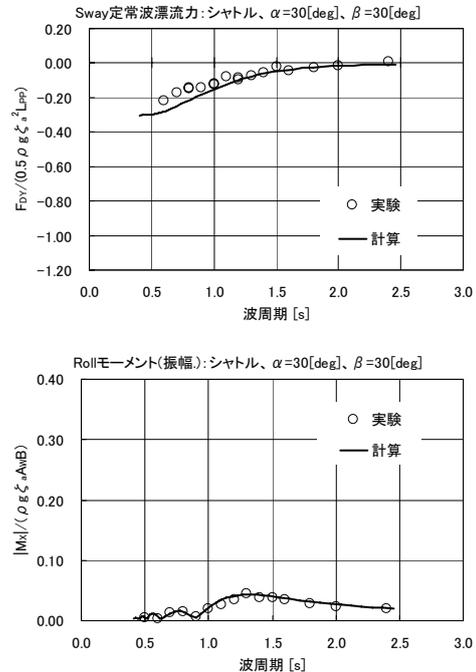


図13 シャトルの波力特性

連成状態でのシャトルの波力特性の一例を図13に示す。尚，計算結果は単独時の波力を示している。ほとんどのケースで，実験結果と計算結果は良く一致し，連成時であっても単独時の特性を用いて良いことが分かった。但し，一部のケースで相互干渉影響が確認されたため，相互干渉影響が確認されるケースではそれを考慮する形でデータベース化を行った。

5. 総合模型実験

実験は当研究所の海洋構造物試験水槽（実験時水深1.5m）で行った。タレット係留したFPSOに，シャトルをタンデム係船で接続し，波，流れ，風の複合環境外力下でのFPSOとシャトルの平衡位置を計測した。写真3に実験の様子を，図14に前節までに示した環境外力推定法を示す。このフローを基に，複合環境外力下でのFPSOとシャトルの平衡位置を推定した。



写真3 総合模型実験

最終的に、推定法で求めた外力を用いて複合環境下での2浮体の平衡位置を算出し、それを総合模型実験結果と比較し妥当性を示した。

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、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) 加藤俊司他：天然ガス FPSO の開發現状と実現化へ向けての技術課題，第4回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集，pp.79-84，2004年7月
- 2) 正信聡太郎他：天然ガス液体燃料化 FPSO の開発，第4回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集，pp.85-92，2004年7月
- 3) 難波康広他：NGH-FPSO 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—，第4回 海上技術安全研究所 研究発表会講演集，pp.93-98，2004年7月
- 4) Bas Buchner et al., “Wind Shielding Investigations for FPSO Tandem Offloading”, The Proceedings of 12th ISOPE- 2002, Paper No. 2002-JSC-268
- 5) C. H. Fucatu et al., “THE SHADOW EFFECT ON THE DYNAMICS OF A SHUTTLE TANKER”, Proceedings of 20th OMAE, ASME, file No.OFT-1132, 2001.6
- 6) 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
- 7) T. Asanuma, et al., “Environmental Forces on FPSO and Shuttle Tanker during Tandem Offloading”, International Symposium on Technology of Ultra Deep Ocean Engineering, 2005
- 8) 加藤俊司：高次元境界要素法による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

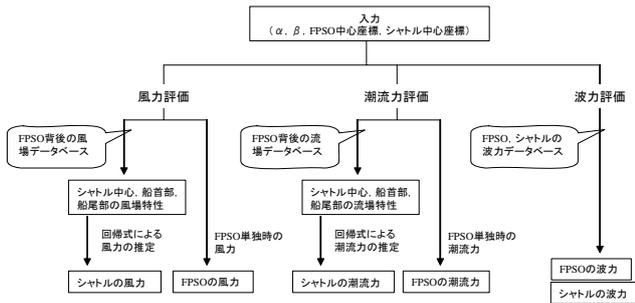


図14 環境外力推定フロー

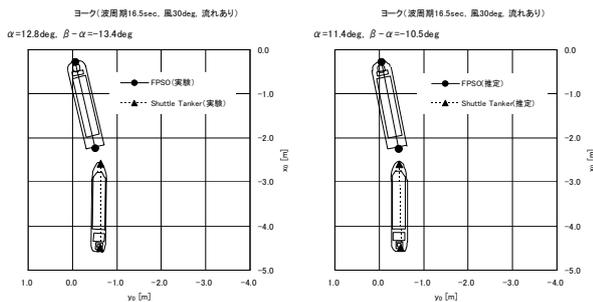


図15 FPSOとシャトルの平衡位置

図15に示す通り、本手法を用いて推定したFPSOとシャトルの平衡位置は、実験値のそれと概ね一致しており、本推定法の精度が確認出来た。

6. おわりに

本論文では、FPSOとシャトルに作用する複合環境外力について、風洞及び水槽実験結果を基に述べた。風力及び潮流力については、FPSOの遮蔽影響を受けてシャトルに作用することを確認し、著者らが開発した推定法の精度の確認を行った。波力については、ほとんどのケースで干渉影響が存在しないことを確認し、干渉影響が存在するケースのみ実験結果を用いてデータベースを構築した。