



# 新形式係留システムの安全性評価技術

平成26年6月25日

齊藤昌勝・加藤俊司・湯川和浩(海洋開発系)

藤原敏文(洋上再生系)

浅沼貴之・大坪和久(JOGMEC)

## 1. 係留システムの最新動向

大水深化

チェーン・ワイヤー → チェーン・合成繊維ロープ

カテナリー → トートレグ

海象条件・用途に応じたシステム形式

## 2. 係留安全性評価技術の動向

準静的安全性評価 → システムの時間領域シミュレーションに基づく動的  
安全性評価へ

## 3. 課題解決と時間領域シミュレーションに基づく安全性評価例

以下の課題を解決しつつGeneric FLNGとRound floater の安全性評価  
例を示す。

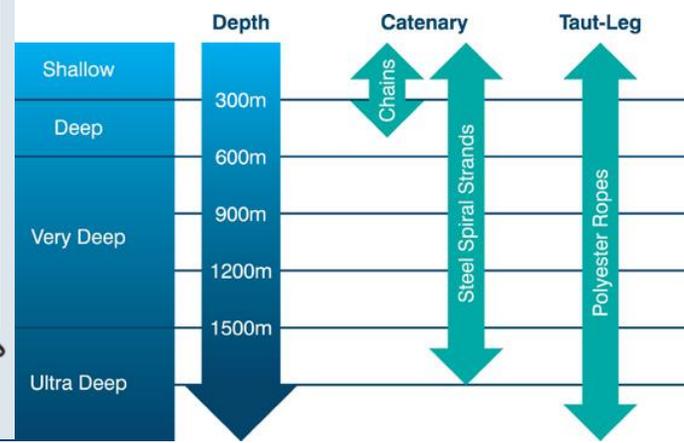
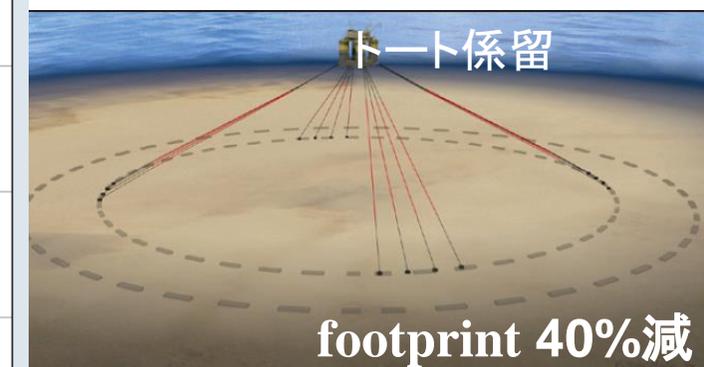
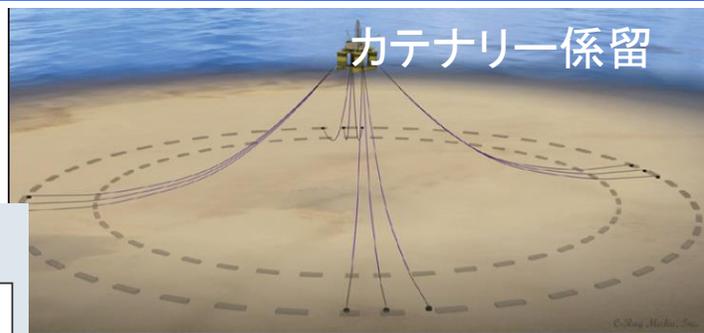
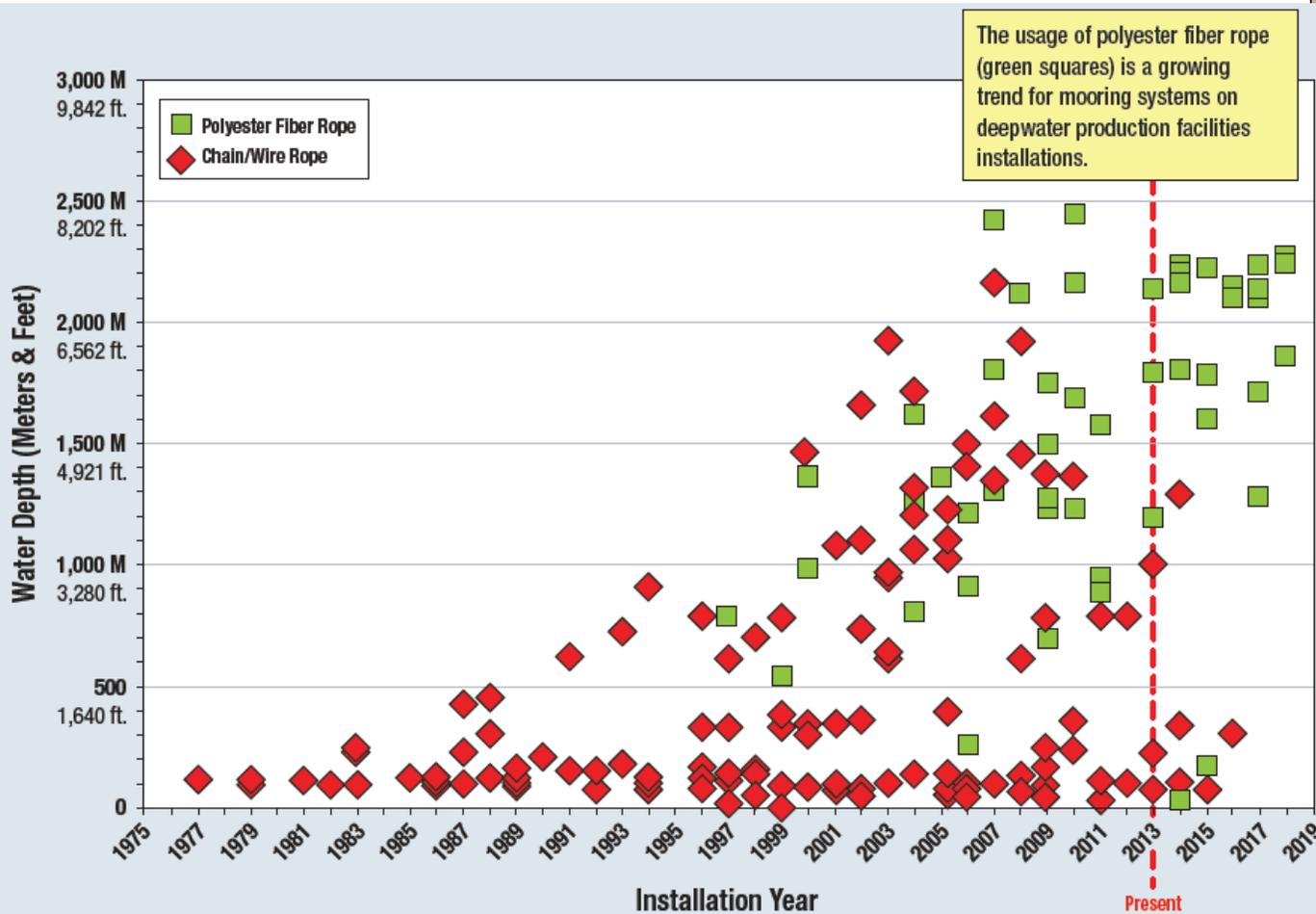
[両]チェーン・合成繊維索複合ライン → 浮体・係留ライン一体動的解析

[GFLNG] 2次長周期ロール → Middle Field法による波漂流モーメントの高精度化

[Round floater] VIM → VIM挙動予測法の開発

## 4. まとめ

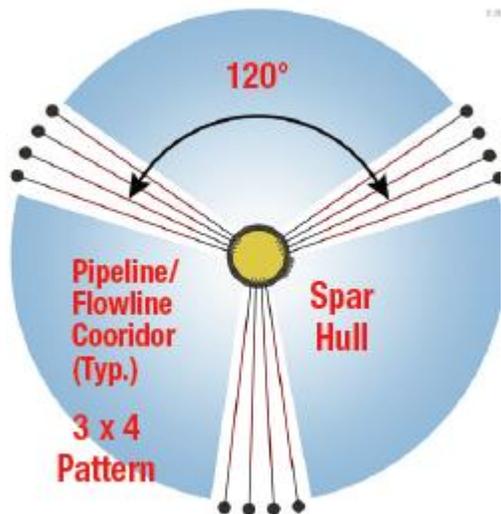
大水深域では合成繊維索の使用が急増  
カテナリーよりもトート(レグ)係留へ



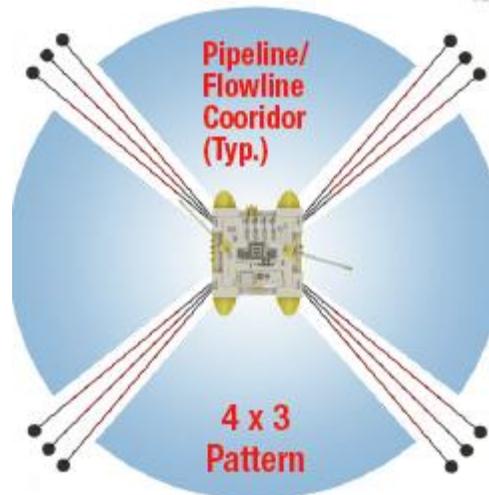
出典: 'MOORING SYSTEMS FOR OFFSHORE FLOATING INSTALLATIONS', Offshore OCTOBER 2013

## スプレッド係留

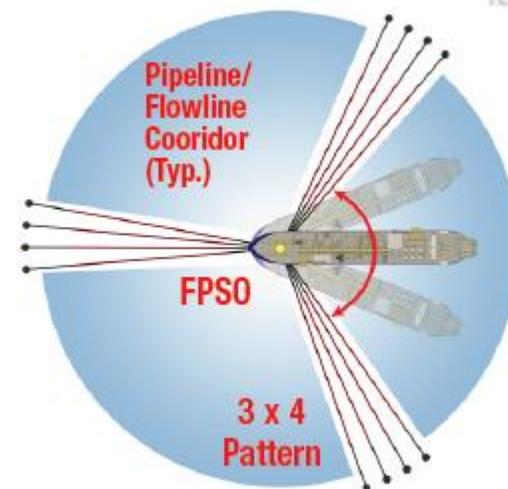
Spar/モノコラム



Drilling Rig(MODU)

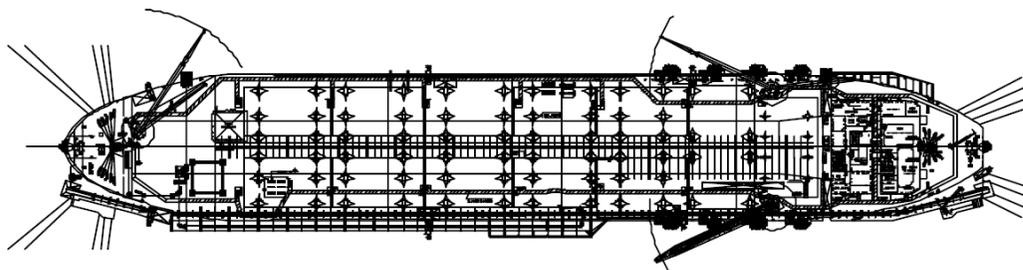


## タレット係留

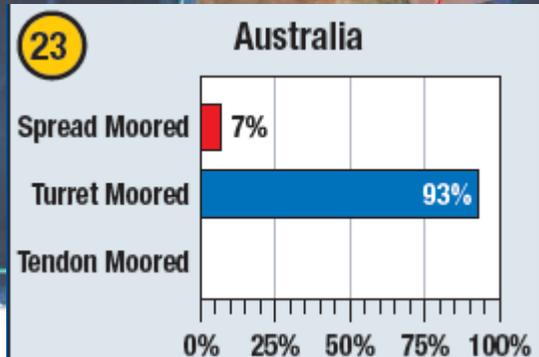
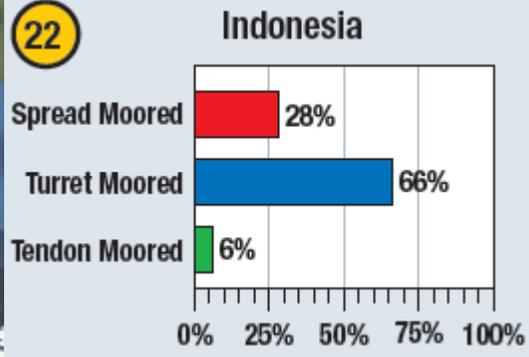
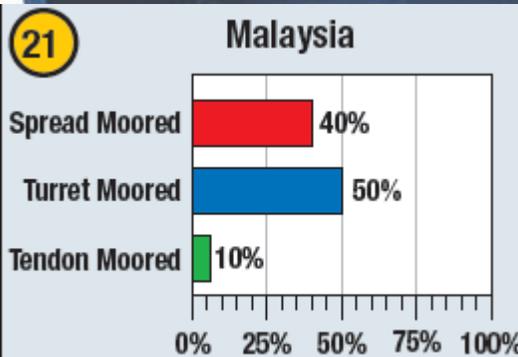
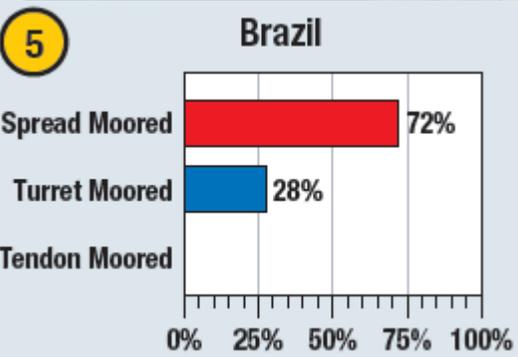
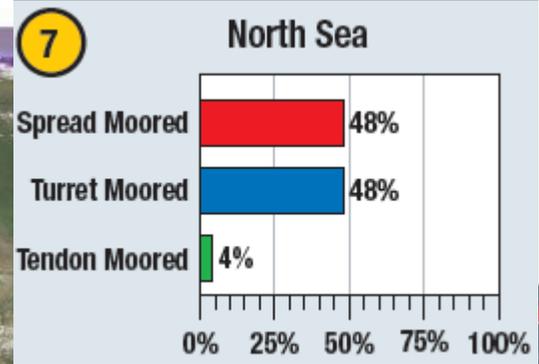
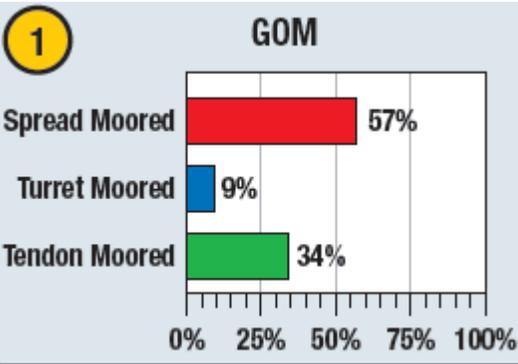
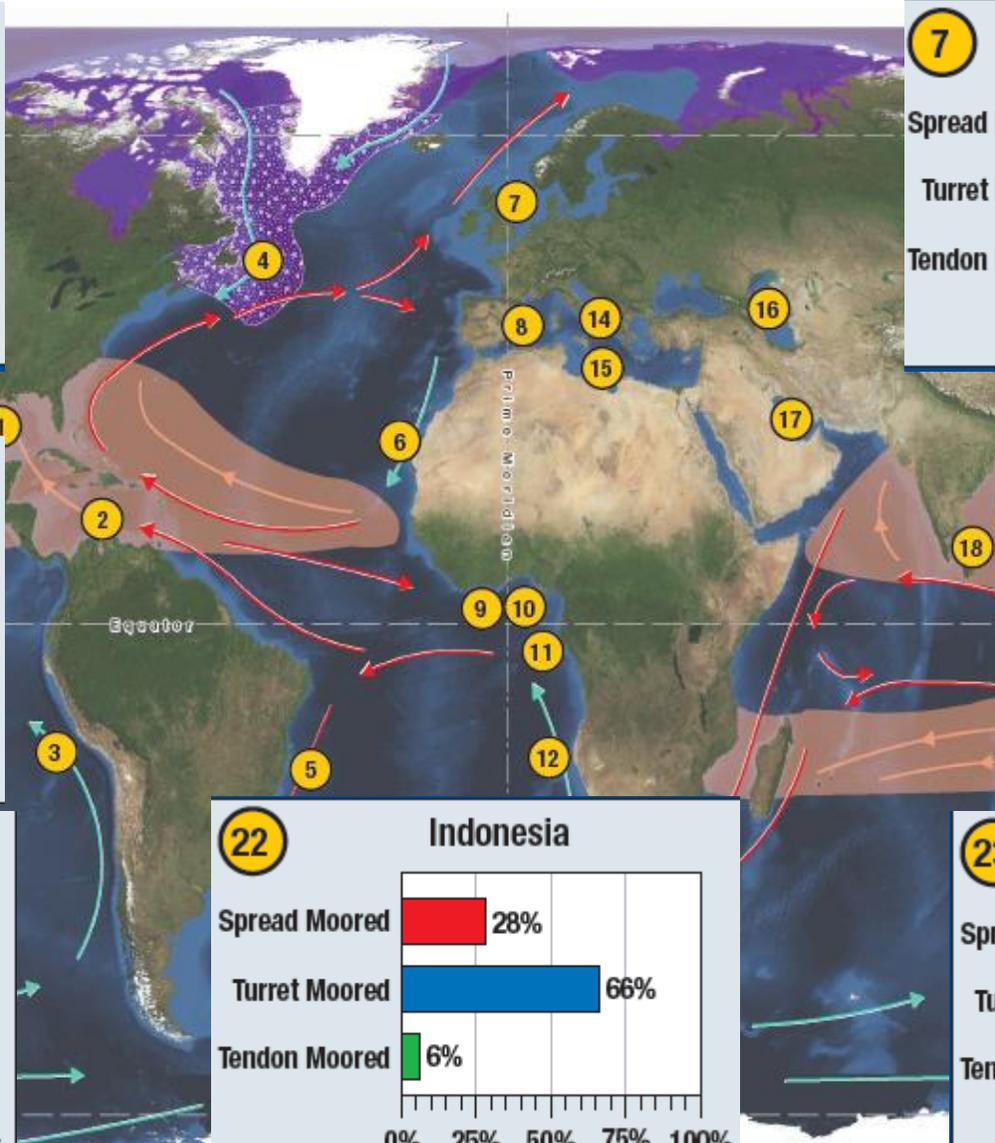


## 世界的にクラスター(バンドル)係留パターンの傾向

ブラジルではDICAS (Differential Compliance Anchoring System) と呼ばれるスプレッドトート係留方式もある



出典: 'MOORING SYSTEMS FOR OFFSHORE FLOATING INSTALLATIONS', Offshore OCTOBER 2013



出典: 'MOORING SYSTEMS FOR OFFSHORE FLOATING INSTALLATIONS', Offshore OCTOBER 2013

設置海域の大水深化、合成繊維ロープの出現によりISO等で動的評価が推奨されるようになった

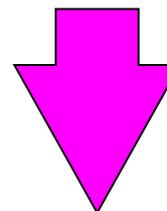
ISO19901-7

Table1-Recommended analysis method and conditions

Type of mooring	Limit state	Condition to be analyzed	Analysis method
Permanent mooring	ULS	Intact/Redundancy check	Dynamic
		Transient	Quasi-static or Dynamic
	FLS	Intact	Dynamic

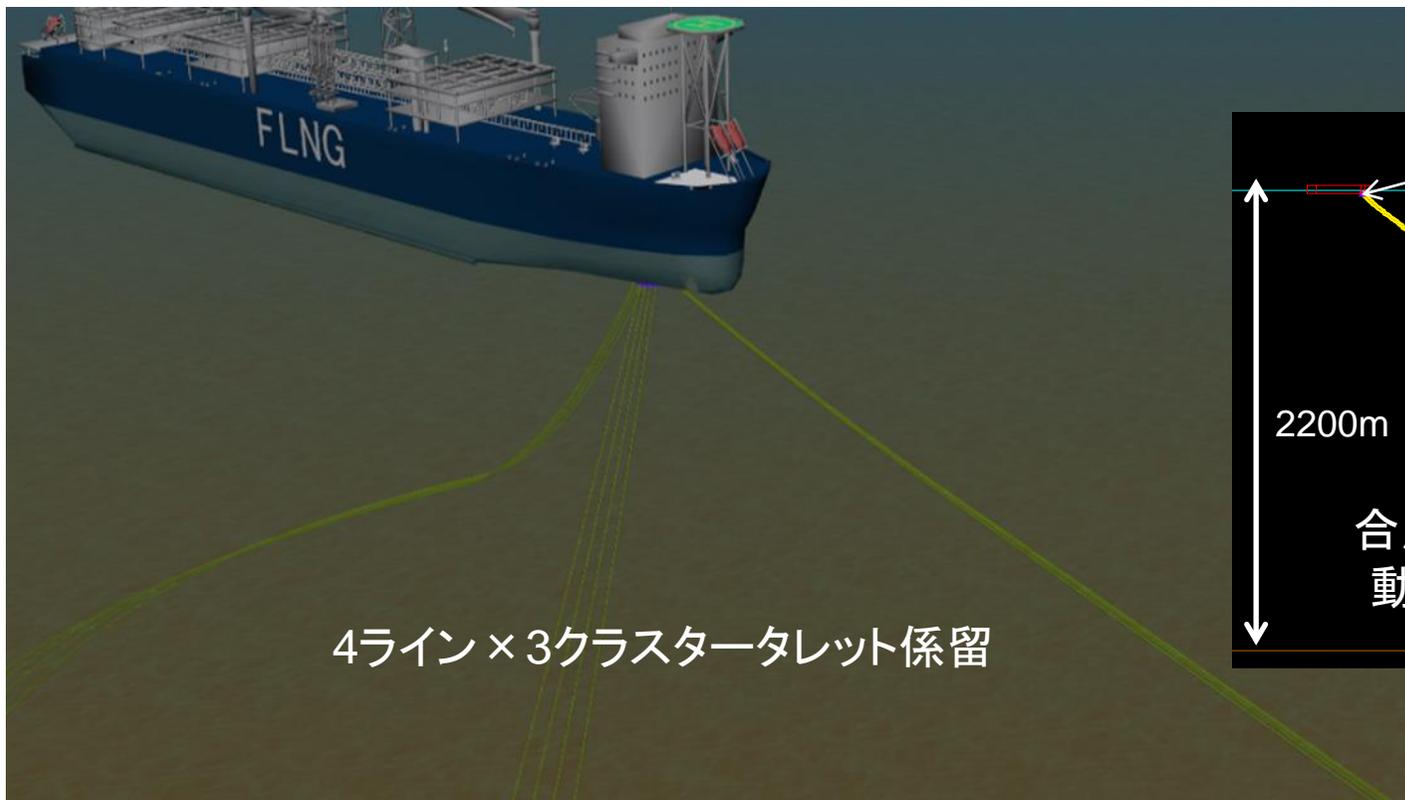
## 準静的安全性評価

浮体動揺のスペクトルから動揺の標準偏差 $\sigma$ を求め、最大オフセットを推定。最大オフセット位置における準静的係留ライン張力を最大張力とする方法。



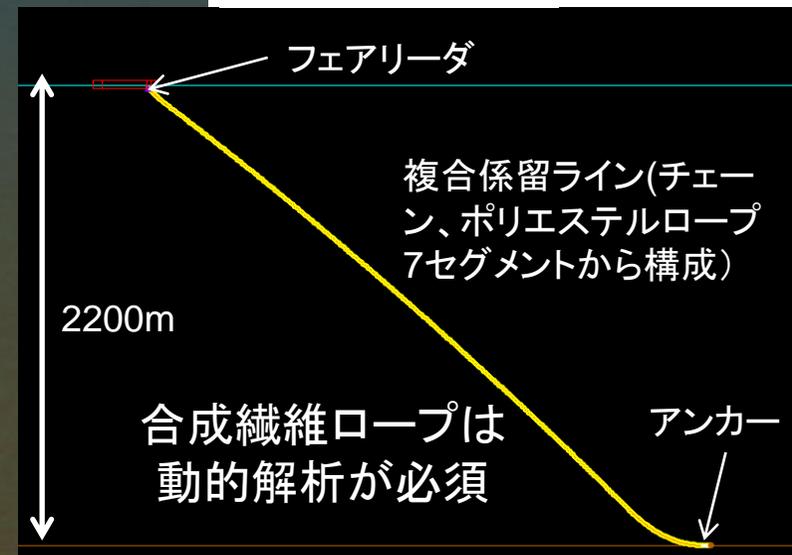
## 動的安全性評価

係留ラインの動的影響を考慮した時間領域シミュレーションによりライン張力の時系列を求め、張力変動の標準偏差 $\sigma$ から最大張力を推定する方法。



4ライン × 3クラスタータレット係留

## 係留設計



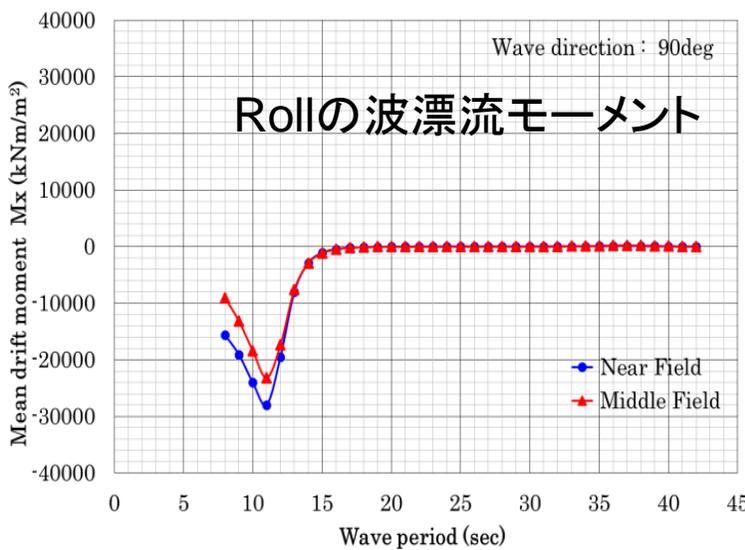
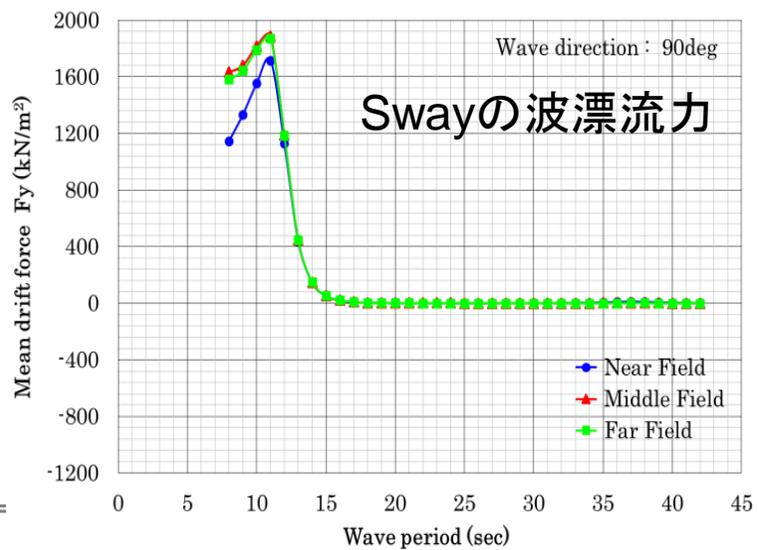
## 係留ライン部材特性

	チェーン	ポリエステルロープ
Nominal Diameter (mm)	120	213
Type	Studless R4	Superline
Axial Stiffness (kN)	1.22976E6	159.4E3
MBL (kN)	13.573E3	12.263E3
Weight in air (ton/m)	0.287	0.0289
Drag coef. Normal	2.4	1.2
Drag coef. axial	1.15	0.8
Added mass coef. normal	1.0	1.0
Added mass coef. axial	0.8	0.0

## 係留ライン構成

Location	セグメントNo.	ラインタイプ	長さ (m)
Fairlead	1	120mm chain	125
	2	213mm polyester	970
	3	120mm chain	5
	4	213mm polyester	970
	5	120mm chain	5
	6	213mm polyester	970
Anchor	7	120mm chain	435
Total length			3480

	Far field (遠場)法	Near Field (近場)法	Middle field 法
定式化	Maruo (1960) Newman (1967)	Ogilvie等 (1983)	Chen (2004)
内容	浮体遠方に検査面を設定し、 <b>運動量保存則</b> から波漂流力・モーメントを求める。	浮体表面上に作用する2次波圧を <b>表面圧力積分</b> することで波漂流力・モーメントを求める	浮体近傍に <b>検査領域</b> を設定し、検査領域面上に作用する2次波圧を <b>表面圧力積分</b> することで波漂流力・モーメントを求める
欠点・利点	浮体表面のメッシュ分割に敏感ではなく、数值的にも robust。	浮体表面コーナー部の数値収束性が悪い	<ul style="list-style-type: none"> <li>・近場法に比べ数値収束性良</li> <li>・短周期波域で遠場法に漸近</li> </ul>
解析可能自由度	3自由度 (surge, sway, yaw)	6自由度 (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)	6自由度 (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)



波漂流力解析に Middle field法が優れている。

## 動揺の各種統計量

	surge	sway	heave	roll	pitch	yaw
Mean	-104.818	211.278	-0.209	-0.265	0.050	-41.211
Std. Dev.	10.919	20.464	0.660	1.910	0.738	14.659
Mean up-crossing period Tz	226.000	323.913	16.589	28.873	15.874	311.800
Mean crest period Tc	24.428	51.828	15.481	18.486	15.113	71.796
m0	119.223	418.793	0.436	3.648	0.545	214.883
時刻歴Max.	<b>-76.495</b>	<b>259.191</b>	<b>2.526</b>	<b>7.725</b>	<b>3.277</b>	<b>-14.267</b>
時刻歴Min.	<b>-130.040</b>	<b>170.078</b>	<b>-2.773</b>	<b>-7.543</b>	<b>-2.936</b>	<b>-67.940</b>
MPM(upper)値	-74.453	<b>265.475</b>	2.168	<b>6.309</b>	2.717	-2.179
MPM(Lower)値	-135.183	157.082	-2.586	<b>-6.839</b>	-2.617	-80.243
MPM両振幅	60.729	108.393	4.754	13.149	5.334	78.064

## 環境条件

流向180° 流速 1.27 m/sec

風向135° 風速 37.85 m/sec

波向135°

有義波高=11.1 m

ピーク周期=15.5 秒

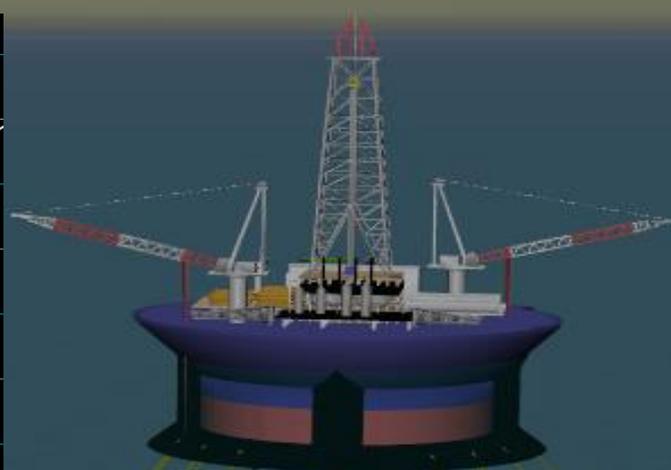
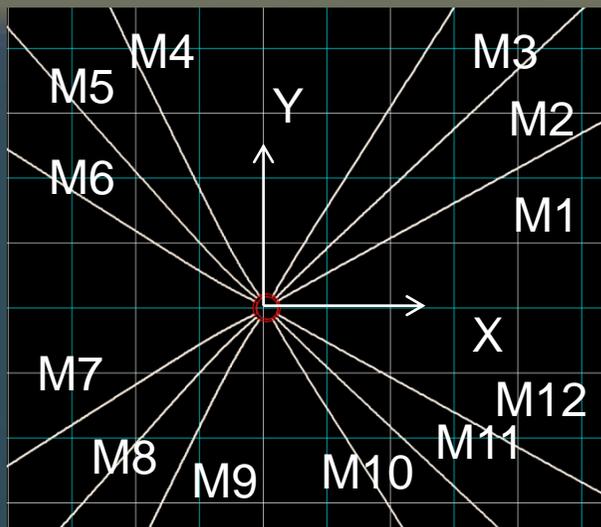
JONSWAP  $\gamma=1.7$

## 係留力の各種統計量

	unit	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Mean	kN	4331.2	4146.3	3956.5	3767.5	417.0	407.6	416.1	416.1	3208.9	3397.8	3590.0	3778.7
Std. Dev.	kN	644.1	634.5	623.2	610.1	35.8	37.2	36.3	36.7	419.0	429.5	438.2	445.7
平均周期Tz	sec	286.0	275.4	247.9	232.8	23.8	25.0	24.6	24.9	170.7	170.6	166.9	150.5
時系列Max	kN	<b>6103.0</b>	5880.8	5649.8	5413.0	538.2	533.2	540.3	542.1	4238.1	4450.9	4662.4	4865.8
時系列Min.	kN	3155.7	3023.1	2888.0	2757.3	294.6	289.1	298.9	301.1	2354.2	2490.8	2635.2	2779.8
MPM_upper	kN	6066.9	5865.2	5668.8	5457.6	542.4	537.2	542.9	544.2	4415.6	4634.9	4855.5	5081.6
MPM_lower	kN	2595.4	2427.5	2244.2	2077.5	291.7	278.1	289.3	288.0	2002.2	2160.8	2324.5	2475.9

ポリエステルロープの最小破断荷重は12,263kN。係留ラインの最大張力が6,103kNであり、安全率2.0を確保(ルールでは1.67以上)しているので安全。

3×4 スプレッドトート  
(ポリエステルロープ) 係留

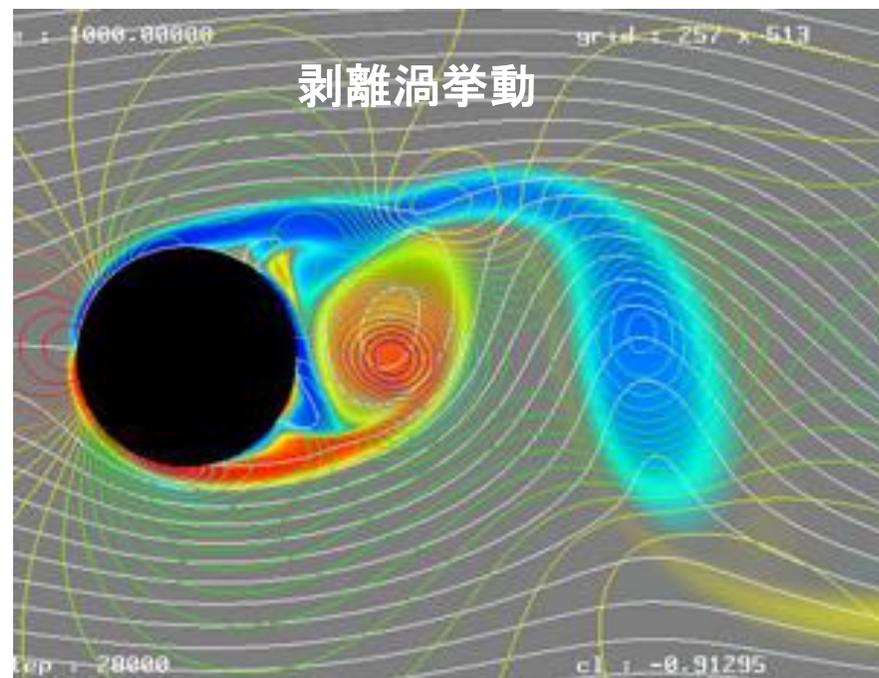
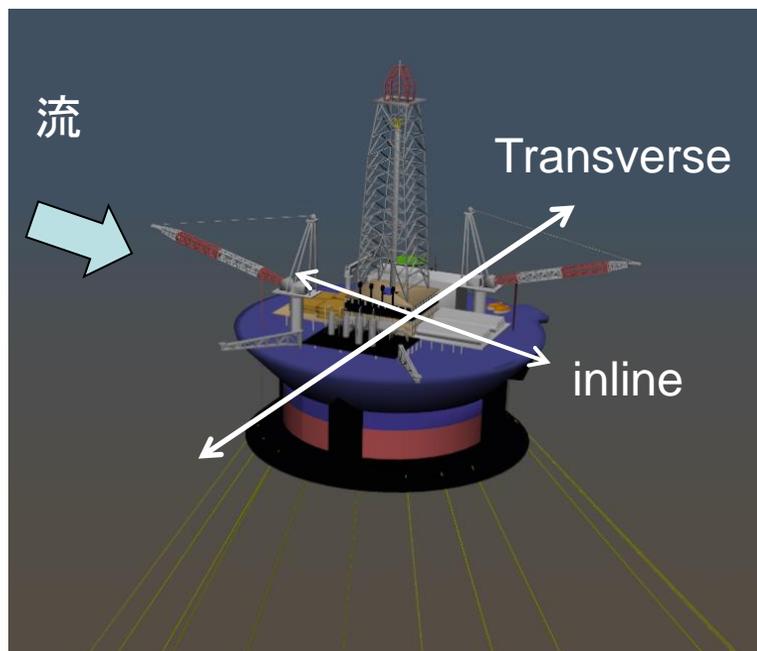


浮体諸元		
L	m	最大径86.0m
B	m	最大径86.0m
$d_{mld}$	m	25
Mass	トン	$73.16 \times 10^3$
水深	m	3000

ポリエステルロープ特性

	設定値
公称径	241 mm
空中重量	63.0 kg/m
EA	86.1 MN
破断荷重	$1.346E+04$ kN
抗力係数 by DnV	法線方向 1
	接線方向 0.4
長さ	4100 m
本数	12 本

合成繊維ロープは  
動的解析が必須



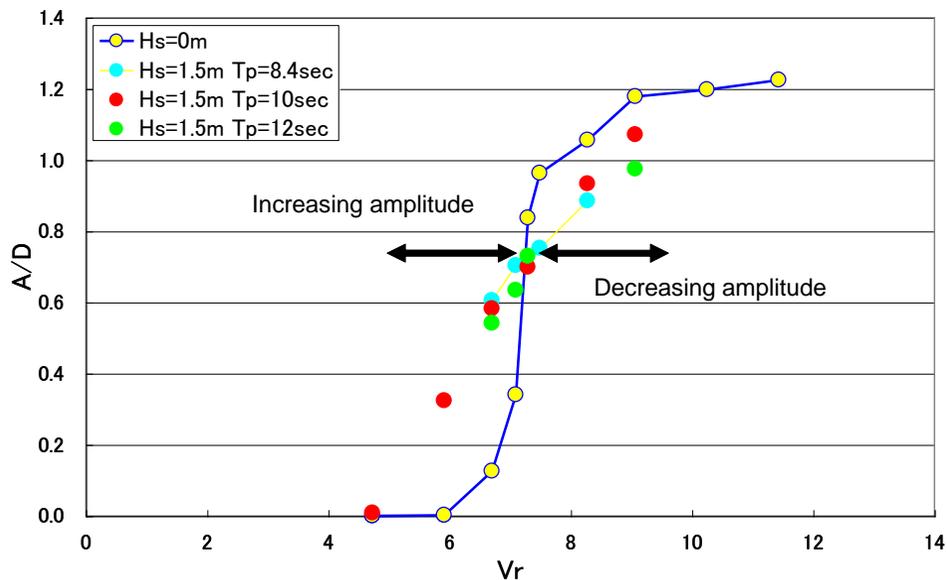
< VIM(Vortex induced motion) とは >

係留された円筒型浮体構造物(Round Floater)に強潮流が作用すると背後に剥離渦が生じこれにより流れに垂直なtransverse方向に、構造物の径と同程度の水平動揺が励起される。なお、流れ方向(Inline方向)にもVIMは生じる。

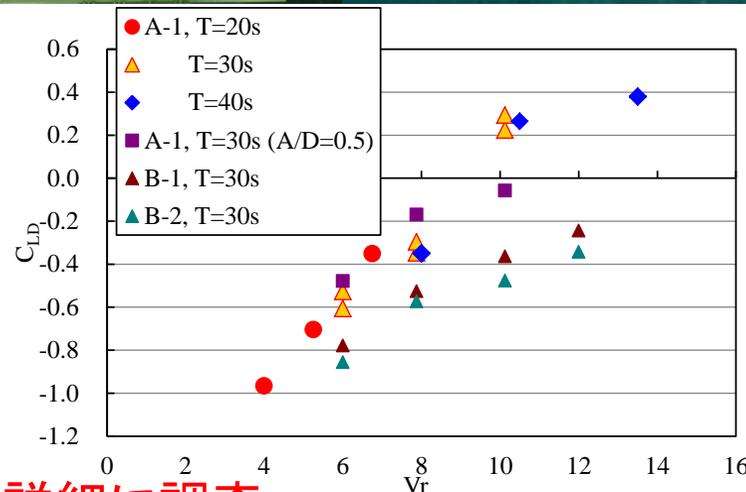
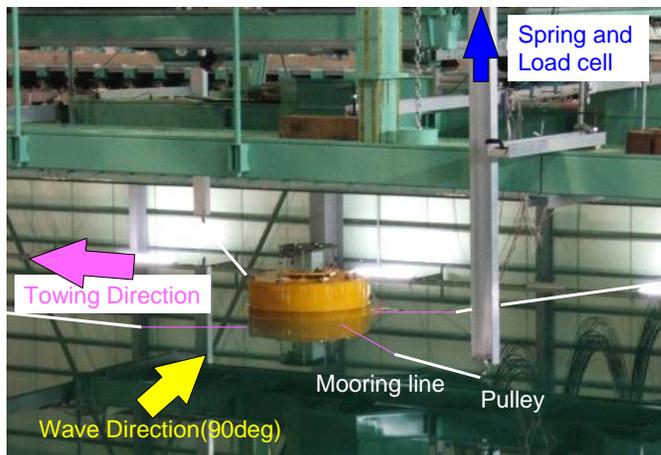
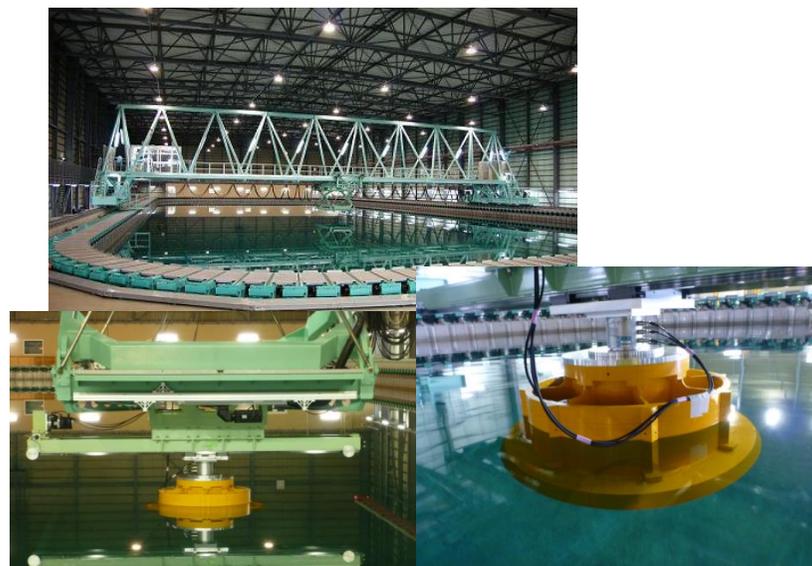
<特徴>

- ・inline VIM振幅はtransverse VIMの20%程度
- ・inline VIM周期はtransverse VIMの半分
- ・潮流と波浪が共存する場においてVIM振幅は増幅する場合がある。

## VIM振幅に対する波浪影響



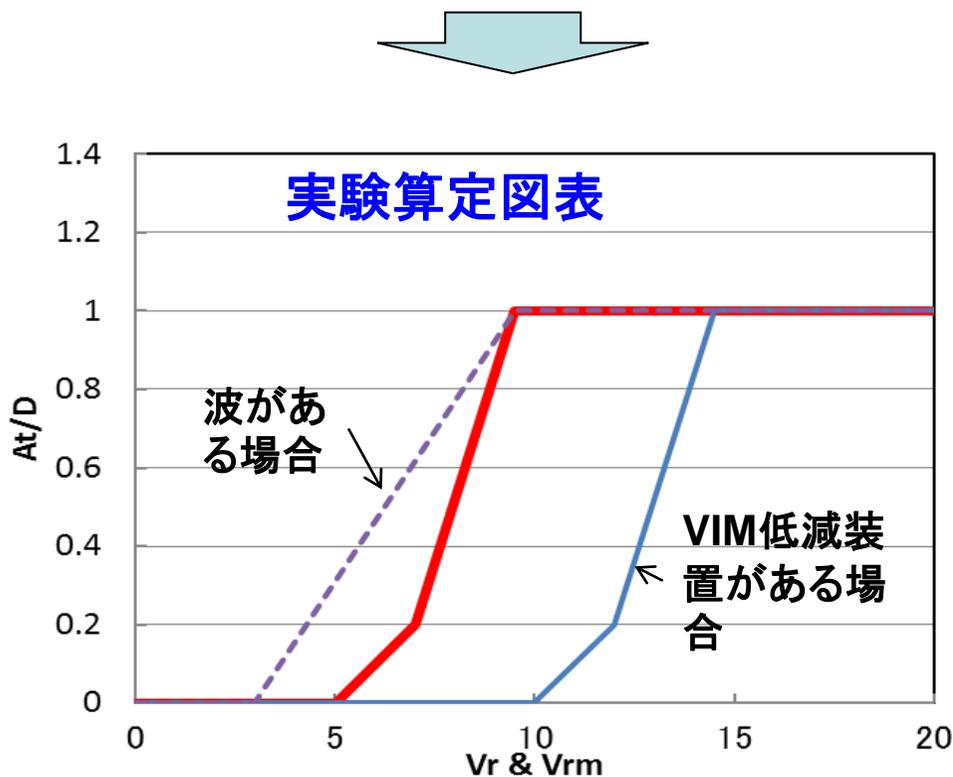
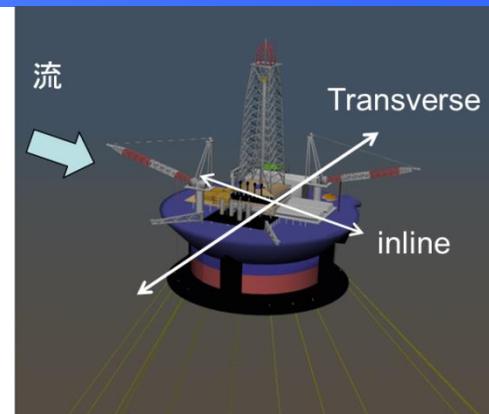
## VIM低減機構による流体力への影響



VIM流体力・波浪影響・形状・付加物影響等を詳細に調査

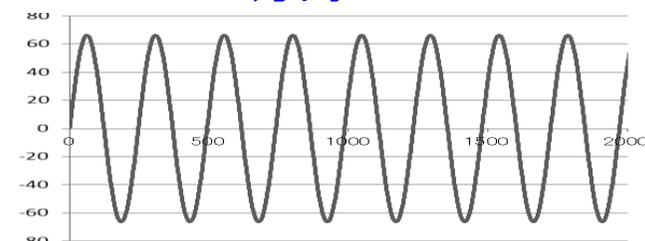
# モノコラム：VIM挙動予測モデル

風・波・流れによる定常外力と係留反力の釣り合い位置に対して  
Transverse方向の固有周期 $T$ 、浮体直径 $D$ 、流速 $V$ から  
Reduced Velocity  $Vr$ が求まる。

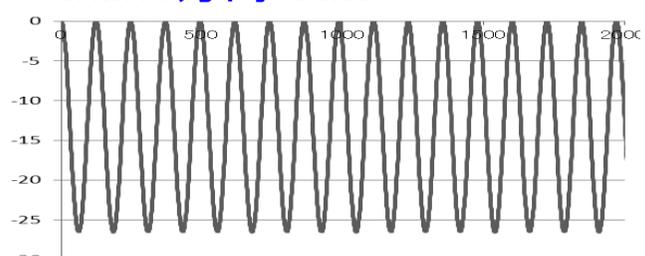


実験算定  
図表からVIM  
時系列は求  
められる

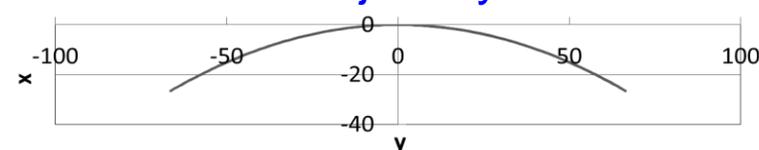
Transverse方向 VIM



Inline方向 VIM



VIM X-Y trajectory

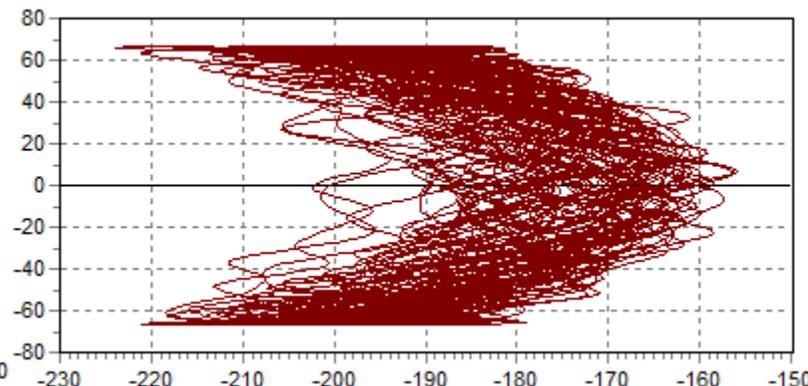
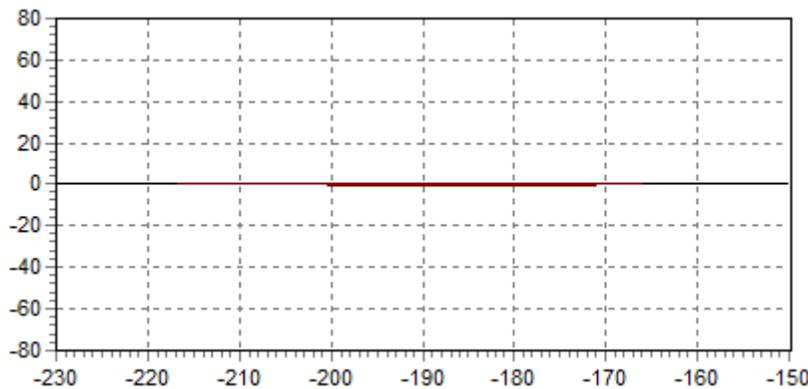


波 180° Hs=15m, Tp=18sec 風速180° 50m/s, 潮流速180° 2.6 m/s(5knot強)

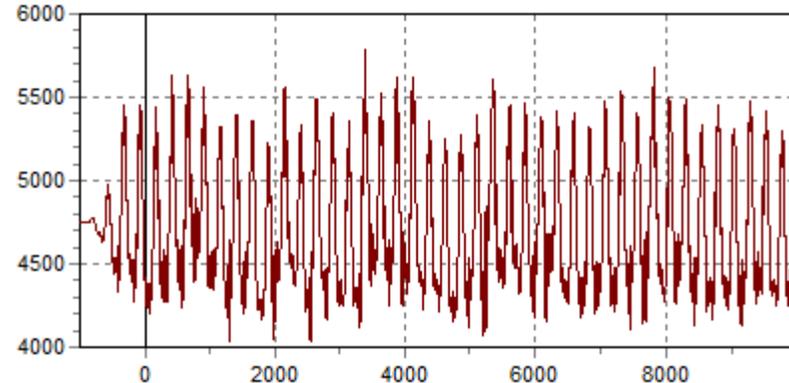
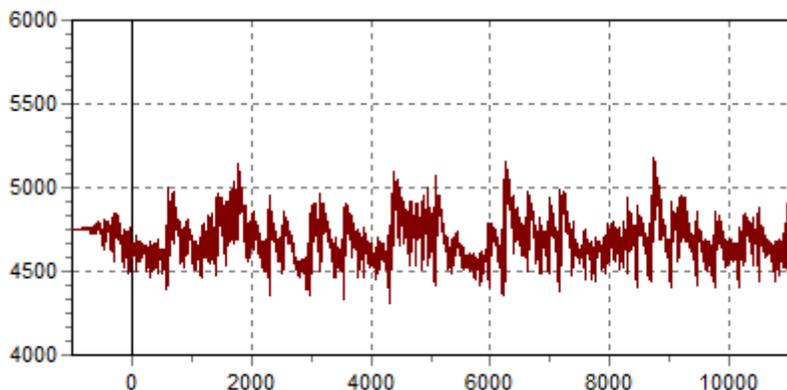
VIM無

VIM有

X-Y拳動



M1ライン張力



VIMを考慮すると14%張力がアップするが安全は確保

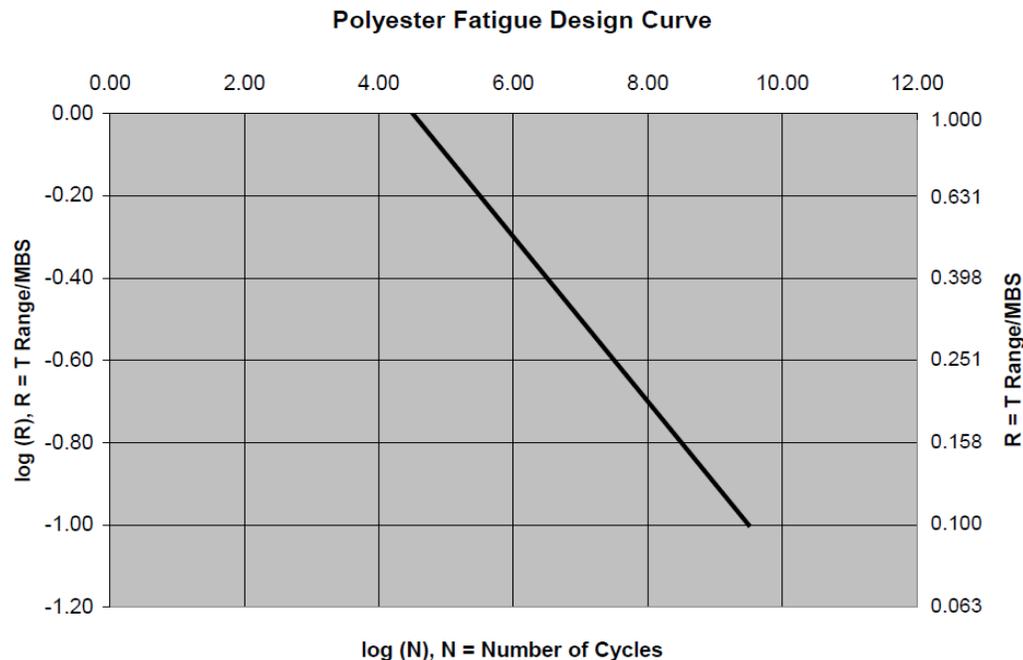
Case	Mooring line No.	3時間中 最大張力の期待値 [kN]	安全率	評価
VIM無	M1 トップ	5102.9	2.64>1.67	OK
VIM有	M1 トップ	5806.9	2.3>1.67	OK

## ABSルール

T-N(張力—繰返し数)特性

$$NR^M = K$$

但し、 $M=5.2$ ,  $K=25000$



係留ライン位置	Arc length (m)	単位時間当たりの疲労被害度		単位日当たりの疲労被害度	
		VIM考慮無	VIM考慮	VIM考慮無	VIM考慮
ライントップ	0	$4.550 \times 10^{-11}$	$2.948 \times 10^{-9}$	$1.092 \times 10^{-9}$	$7.076 \times 10^{-9}$
ラインエンド	4100	$1.211 \times 10^{-10}$	$4.597 \times 10^{-9}$	$2.907 \times 10^{-9}$	$1.103 \times 10^{-7}$

VIM考慮無に比べVIMを考慮した場合は、40倍程度増加する。

- 1) 近年は、大水深域において合成繊維ロープを用いたトートレグ係留を用いた浮体システムが増加する傾向にあり、その安全性評価技術の重要性が高まっている。
- 2) 「Turret moored FLNG」と「Spread moored Round floater」を例として合成繊維ロープを用いたトートレグ係留の安全性評価実施例を紹介した。ここでは、「係留ラインの動解析」、「長周期ロールの評価」、「VIMの評価」が重要な要素と考えられる。
- 3) この他に、「エクスターナルタレット係留FPSO」、「スプレッドトート係留セミサブ」及び「DICAS係留FPSO」等、ほぼ全ての浮体システムについて係留安全性評価の実施が可能である。