# 中間切り離しライザーの不規則波中模型試験

正員 Ш 正員 尾 栄 小 大 正員

Model Test of a Near Surface Disconnectable Drilling Riser in Irregular Waves

by Hironori Yasukawa, Member Masahiko Ozaki, Member Eiji Kogure, Member Kozo Ishida,

Masato Ohashi, Hiroaki Hirayama

#### Summary

Model test of the Near Surface Disconnecable Drilling Riser (NSDDR) which has an air can system near the top for making free-standing condition was conducted by use of a riser model corresponding to 750m length in fullscale. Purpose of the test is to grasp the characteristics of NSDDR in irregular waves with constant current. In the test, we observed remarkably riser's horizontal motions due to vortex induced vibration(VIV), and found that the bending moment variation induced by VIV is the same order as the variation induced to the flow direction of the riser. In the drilling mode, bending moment variation of NSDDR is partially about 25% larger than that of the conventional riser without air can. Bending moment variation in free-standing mode is about 20% of that in hang-off mode at the same significant wave height except the riser bottom. At the riser bottom, both static and significant values of the bending moment become largest, so we should pay attention to the strength.

#### 1. 緒 言

海洋石油開発の対象は深水域へと進展しており、水 深 2,000m を越える深海底を掘削する石油生産向けライ ザーの研究開発が積極的に行われている。

- 三菱重工業長崎研究所 日本海洋掘削
- 石油公団石油開発技術センター

原稿受理 平成14年1月9日 春季譚演会において講演 平成14年5月15,16日

2,000m を越えるような大水深掘削時において、台風 等による急な海象変化に遭遇した場合には, ライザーパ イプを船上にまで揚収する時間が十分には取れないため、 ライザー下端部を海底の抗口から切り離し、掘削船から ライザーを宙吊りにしたいわゆるハングオフ状態で避航 することが考えられている。従って、ライザーは、荒天 下におけるハングオフ状態においても十分な強度を持つ ように設計される。しかし、ライザーパイプの径や材質 を同一のままで大水深化を図ると、ライザーの全質量が 増加するため、ライザー縦強度の面から大水深化に限界 が生じることになる 1)。このような現有技術の延長では、

限界水深は 3,000~4,000m 程度と考えられており、これ以上の大水深化を達成するためには、従来とは異なるライザーシステムを考案する必要がある。

著者等は、大水深掘削を可能とする新しいライザーシステムとして、中間切り離しライザー (Near Surface Disconnecable Drilling Riser: NSDDR) を提案した <sup>2)3)</sup>。この NSDDR は、ライザー上部に air can を設け、緊急時には air can 上部で掘削船とライザーを切り離し、同時に air can に空気を充満させ、ライザーは海中にて free-standing 状態となる。深度数十メートルを越すような海中では波浪影響は小さく、free-standing 状態のライザーは波浪による影響をあまり受けない。その結果、従来のライザーシステムと比較して、NSDDR は一層の大水深化が可能であると考えられている。

この NSDDR の研究開発の一環として、米国 Texas A & M Univ., Offshore Technology Research Center (OTRC) において、実機で 750m 相当のライザー模型を用いた水槽試験を実施した。試験の目的は、NSDDR の挙動や強度に関する特性把握とライザー挙動解析法の検証データ取得の 2 つであった。後者については、既に結果を報告済みである 4)。水槽試験では、ライザーの掘削状態、下端切り離し状態、中間切り離し状態の 3 状態について、想定されうる不規則海象下での模型ライザーの変位、曲げモーメント等を計測した。本論文では、この不規則波中での水槽試験の概要ならびにライザーの変位と曲げモーメントの試験結果について報告し、NSDDR の特徴について言及する。

なお、不規則波中におけるライザーの応答を取り扱った研究として、前田等 5) の研究があげられるが、ここで対象とする NSDDR のような大水深ライザーを対象としたものではないことを付記しておく。

#### 2. 水槽試験

#### 2.1 不規則波中試験の概要

実際の海象環境を模擬するため、水槽において不規則 な波と一定流速の潮流を発生させ、さらに掘削船の運動 を模擬してライザー上端部を強制的に動かして、そのと きのライザー挙動や曲げモーメント等を計測した。

Table 1 に試験における海象状況を示す。表中、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_P$ はピーク波周期である。これらは、特定の海域を想定したものではなく、実際の運用状況等を鑑み経験的に決定されたものである。

潮流は、深さ方向で異なる潮流速分布とした (A-1 参照)。 波は、Jonswap 型スペクトルを用いた長波頂不規則波とし、波方向は潮流方向に一致させた。

ライザー上端部では、掘削船の運動を模擬するため、 水平方向に一方向の不規則強制加振運動を与えた。加振 の方向は波 (潮流) 方向に一致させた。強制加振運動の信号は、波に対し 150deg の方向に船首を向けた掘削船の surge 運動の RAO および位相角を基に、船の漂流運動を加味して作成された。そのときの surge 運動の有義値は drilling limit において 3.7m, non-drilling limit において 5.3m であった。

Table 1 Significant wave height, peak period of irregular waves and surface current velocity

Environment	$H_{1/3}$	$T_{P}$	$V_C$
Drilling limit	4.88m	9.94sec	1.75kn
Non-drilling limit	6.52m	10.93sec	1.75kn
Max Env.	15.12m	15.70sec	3.00kn

#### 2.2 水槽設備

水槽試験は、米国 Texas A & M 大学、Offshore Technology Research Center(OTRC) にて実施した。OTRC は、長さ 45.7m、幅 30.5m の水槽を保有しており、その中程には平面 9.1m × 4.6m、最大深さ約 17m の deep pit がある。この deep pit を使用してライザーの水槽試験を実施した。

#### 2.3 ライザー模型

対象としたライザーの外径は 21inch(0.533m) であり、最大深度 2,000m として設計された。設備の制約から 2,000m 相当の試験は困難であったため、設計されたライザーの中程をカットし、長さ約 750m 相当のライザーとして試験が行われた。本ライザーシステムの特徴は、free-standing 状態を作るための air can がライザー上方部に付くことである (Fig.1(c) 参照)。 air can 部の直径は実機で 3.5m、長さは 57.6m であり、約210ton の浮力を発生させることができる。

水槽試験のため,スケール比 1/46 のライザー模型を 製作した。模型ライザーは,実機のスチール製ライザー (ヤング率 2.24×10<sup>6</sup>[Pa]) と相似な曲げ剛性を持つステ ンレススチール製チューブで表すこととし,実機の曲げ

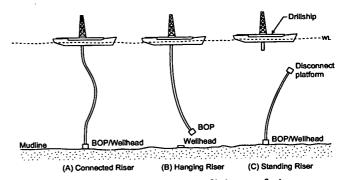


Fig. 1 3 operation conditions of riser

Table 2 Boardary contained to the total				
	Mode	Upper Boundary	Lower Boundary	
C-1	Connected (with air can)	tensioner(upward free)	hinged	
C-2	Connected (w/o air can)	tensioner(upward free)	hinged	
H-1	Hanging (hang-off)	hinged	free	
H-2	Hanging (with BOP)	hinged	free	
F-1	Free-standing	free	hinged	

Table 2 Boundary conditions of risers

剛性に一致するように選定された。水中重量調整のため、 実機で直径 1.17m、模型で直径 1inch(25.4mm)の浮 力体を深度方向全てにわたって装着させ、ライザー水 中重量の分布は、実機とほぼ同じになるよう調整した。 air can による浮力は、air can 模型内部に模擬浮力体 を入れることによって発生させた。ライザー模型下端 には Blow-Out Prevention(BOP) や Lower Marine Riser Package(LMRP)の模型が付く。また、BOP ス タック上方と air can 上方は flex joint 模型で接続され、air can 下部は stress joint 模型で接続される。な お、ライザー模型の具体的な重量分布については、前報 4)で報告済みであるため、ここでは省略する。

#### 2.4 ライザー作動状態

ライザーの作動状態として、Table 2 に示す 5 つを対象とした。同時に、上下端部での境界条件を示す。

C-1, C-2 が掘削状態を模擬したものであり,C-1 と C-2 を比較することにより,air can 装着の影響を知ることができる。ライザー上端部は,tensioner を介して,掘削船の動きを模擬する水平運動の強制加振機に接続され,Top Tension は実機で 241.5ton とした。

H-1, H-2 が下端切り離し状態を模擬したものである。 H-1 がいわゆるハングオフモードであり、LMRP のみを吊り下げた状態である。H-2 はライザーを降下して行き下端結合状態に至る直前の状況を模擬したもので、ライザー下端に BOP が付く。H-1 と H-2 を比較することにより、下端部重量の影響を把握することができる。

F-1 が今回対象とする NSDDR の特徴と言うべき状態であり、緊急離脱状態を意味する。air can 上部でライザーが切り離され、air can の浮力により free-standing 状態が作られる。

#### 2.5 変位と曲げモーメントの計測

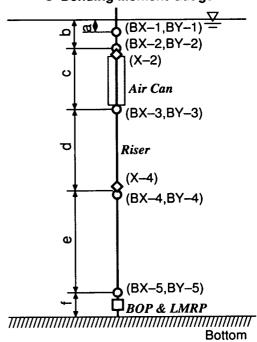
ライザーの主流方向の変位は、2 台の水中カメラを用いたオプティカル・トラッキング装置を用いて計測された。曲げモーメントは、主流(前後)方向とそれに垂直(左右)方向の2つの曲げモーメントを計測するため、2つの専用ストレインゲージを90deg ずらして、ライザー芯にマウントされる。

Fig.2 に、曲げモーメントとライザー変位計測位置を

示す。図中、"BX" は主流方向曲げモーメントを、"BY" は横方向曲げモーメントを意味し、数字の 1,2,3,4,5 は 位置を表す。 なお、 BY-5 は途中から計測が不能となり、 有意なデータが取得できなかった。

実験では、実時間で約3時間に相当する計測を行った。得られたデータは、スペクトル解析を行い、定常値や有義値等を求めた。なお、本論文では、変位と曲げモーメントについてのみ言及することとし、結果は全て実機相当の値で表示する。

# ♦ Light for Tracking♦ Bending Moment Gauge



	fullscale	model
a	45.7m	0.99m
b	87.0m	1.89m
С	67.0m	1.46m
d	216.9m	4.72m
е	367.9m	8.00m
f	32.3m	0.70m

Fig. 2 Position for measurement of riser displacement and the bending moment

#### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 掘削状態

# (1) 変位

Table 3 に air can 上部 (X-2) とライザー中間部 (X-4) におけるライザー主流方向変位の定常値と有義値を示す。また、Fig.3 に、drilling limit 状態における X-2、4位置でのライザー主流方向変位のパワースペクトルを示す。なお、本結果には、周波数 0 付近において非常に高いピークがあり、それを除外している。Table 3 における有義値を見ると、air can の有無による影響は小さいものであるが、X-2 における変位のパワースペクトルを見ると、air can の装着によって加振のピーク周波数 (円周波数 0.63、周期 9.9sec に相当) 付近の横変位変動が小さくなっていることが分かる。これは、air can の装着に伴う質量や運動減衰の増加によって、ライザーの揺れが小さくなったと考えられ、前報 1) で報告した規則加振の結果と同じ傾向にある。

Table 3 Static and significant values of displacements in connected mode (drilling limit)

		static	significant
with Air Can	(X-2)	12.26m	3.10m
w/o Air Can	(X-2)	12.23m	3.15m
with Air Can	(X-4)	10.54m	2.00m
w/o Air Can	(X-4)	10.98m	1.92m

#### (2) 曲げモーメント

Fig.4 に解析によって得られた主流方向の曲げモーメントの定常値を示す。定常値には添え字 S を付けて標記している。横軸には、曲げモーメントの計測位置を表す番号をとっている。定常値のほとんどは、一様潮流によって生じる定常的な曲げモーメント成分と考えられ、表層潮流が同じである drilling limit と non-drilling limit の結果に大きな差異は見られない。BX-1(air can と静水面の中間位置)において、最も大きな定常曲げが作用しており、これは、前報 4)で報告した静的な潮流中での計測結果と同じ傾向にある。なお、主流方向に対し横方向の曲げモーメントの定常値は、主流方向のそれに対し1桁小さいためここでは示していない。

Fig.5 に曲げモーメント変動の有義値を示す。有義値には添え字 1/3 を付けて標記している。BX-1,-3(BY-1,-3) 位置すなわち、air can と静水面の中間位置ならびに air can 下部位置において、主流方向ならびに横方向に大きな曲げモーメント変動が発生する。横方向の

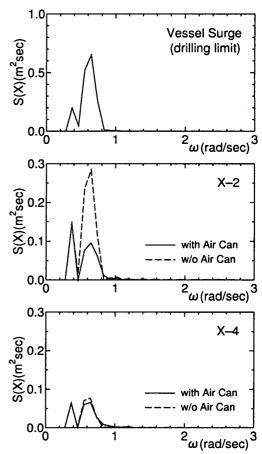


Fig. 3 Power spectra of the riser top displacement given in the test and the riser displacements for connected mode

曲げモーメントのオーダは、主流方向のそれとほぼ同じである。曲げモーメント変動は、どの位置においても、drilling と non-drilling limit の違いによってあまり変化しない。これは、水深が深くなることにより、波の影響が急激に弱まり、有義波高による差異が顕著には現れないためと考えられる。air can の影響を見ると、air can が付くことにより、BX-1,-3 や BY-1,-3 位置の曲げモーメント変動が 20~30%増加していることが分かる。air can の装着は、前述の通り、X-2 位置での横変位変動を減少させる効果を持つが、ライザーの重量分布に大きな段差が発生し、ライザーの変位曲率が大きくなり、全般的には曲げモーメントを増加させる方向となる。

Fig.6 に曲げモーメント時系列結果のパワースペクトルを示す。BX-1 の結果から、本ライザーの曲げに関する 1 節から 4 節までの固有円周波数 (1 節:0.63, 2 節:1.20, 3 節:1.82, 4 節:2.48) が把握でき、air can の有無によって、この特性に大きな変化の無いことが分かる。主流方向の曲げモーメント変動は、air can の装着により、1 節の固有周波数付近の値が増加する。一方、

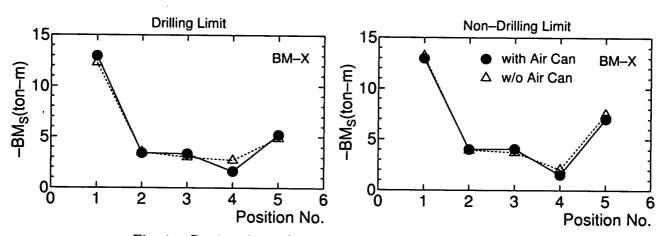


Fig. 4 Static values of bending moment in connected mode

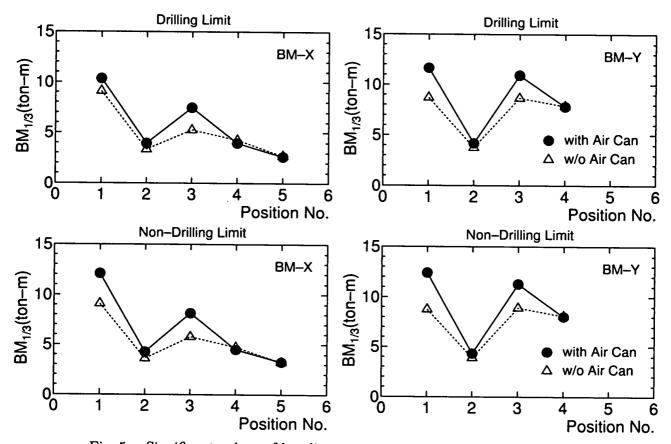


Fig. 5 Significant values of bending moment variation in connected mode

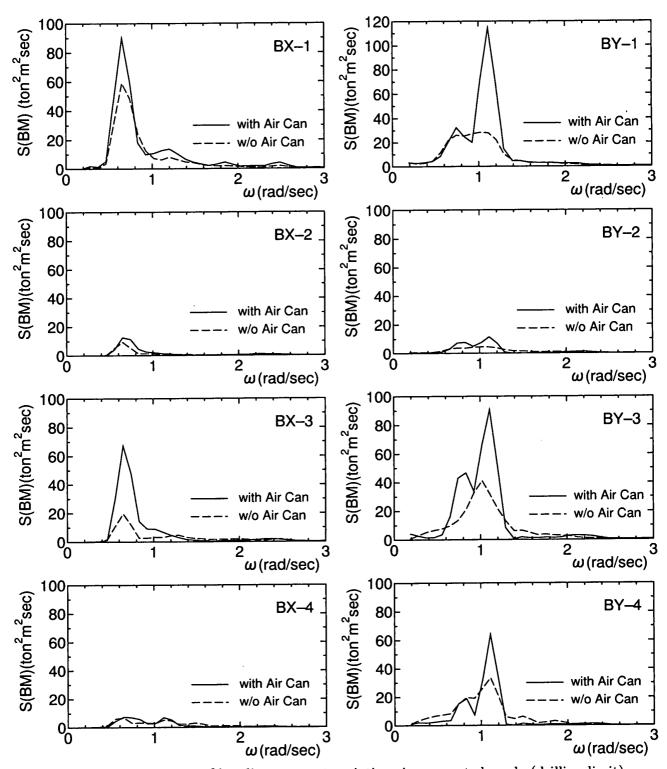


Fig. 6 Power spectra of bending moment variations in connected mode (drilling limit)

横方向の曲げモーメント変動は、air can の装着により、2 節の固有周波数位置の値が増加している。これは、ライザーに高周波な動揺が発生しているためであり、ライザーへの渦励振 (VIV) が直接の原因であると思われる。本試験における VIV による起振力の周波数は、2 節の固有周波数に近いと考えられ、air can の装着は VIV による起振力を増大させ、横方向の曲げモーメント変動を増加させることが分かる。

#### 3.2 下端切り離し状態

# (1) 変位

Table 4 に、BOP 降下時 (with BOP) とハングオフ時 (Hang-off) の X-2,-4 位置におけるライザー主流方向変位の定常値と有義値を示す。下端重量の小さなHang-off のほうが、定常値、有義値ともに with BOPよりも増加する。Fig.7 に、Non-drilling limit 状態における X-2,-4 位置でのライザー主流方向変位のパワースペクトルを示す。X-2 におけるパワースペクトルを見ると、Hang-off の方がピーク周波数 (円周波数 0.58、周期 10.9sec に相当) 付近の値が明らかに大きくなっている。この傾向は、前報 4) で報告した規則加振の結果に一致しており、下端部重量が小さくなって張力が下がり、ライザーがたわみ易くなったものと考えられる。

Table 4 Static and significant values of displacements for connected mode (non-drilling limit)

		static	significant
with BOP	(X-2)	22.80m	4.84m
Hang-off	(X-2)	26.41m	4.95m
with BOP	(X-4)	25.40m	4.26m
Hang-off	(X-4)	31.72m	4.33m

#### (2) 曲げモーメント

Fig.8 に Hang-off と with BOP における主流方向 の曲げモーメントの定常値を示す。両者を比較すると, BX-1(air can と静水面の中間位置) では with BOP の 結果が大きく,BX-3(air can 下部位置) では Hang-off の結果が大きい。この傾向は,前報 4) で報告した静的な 潮流中での計測結果と同じである。

Fig.9 に下端切り離し状態における曲げモーメント変動の有義値を示す。掘削状態の場合と同様に、BX-1,-3(BY-1,-3)位置において、主流方向ならびに主流方向に対して横方向に大きな曲げモーメント変動が作用する。この横方向の曲げモーメント変動もまた、VIVによって発生したと考えられる。下端部重量の小さな Hang-offの方が、主流方向の曲げモーメント変動が大きいのに対

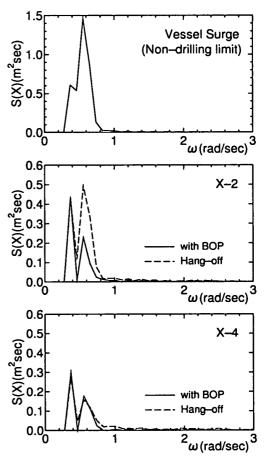


Fig. 7 Power spectra of the riser top displacement given in the test and the riser displacements for hanging mode

し、横方向の曲げモーメント変動は下端部重量の影響が 小さいように見える。

Fig.10 に曲げモーメント時系列結果のパワースペク トルを示す。BX-1 の結果を見ると、本ライザーの曲げ に関する 1 節から 4 節までの固有円周波数が把握でき る。2節までの固有周波数を比較すると、with BOP(1 節:0.6, 2 節:1.2), Hang-off(1 節:0.6, 2 節:1.0) である。 Hang-off と with BOP では、2 節の固有周波数におい て差異が見られる。Hang-off における主流方向の曲げ モーメント変動は、下端重量の減少に伴い張力が減少す るため、ライザーはたわみやすくなり、特に1節の固有 周波数付近の値が増加する。一方、横方向の曲げモーメ ント変動では、VIV による起振力の周波数が2節の固有 周波数付近にあり、Hang-off と with BOP での 2 節の 固有周波数周波数の違いがパワースペクトルにおける分 布の差異となって現れる。2節レベルでの共振は、広い 周波数レンジに影響を及ぼすようであり、曲げモーメン トの有義値としてみれば、下端重量の違いによる差異は

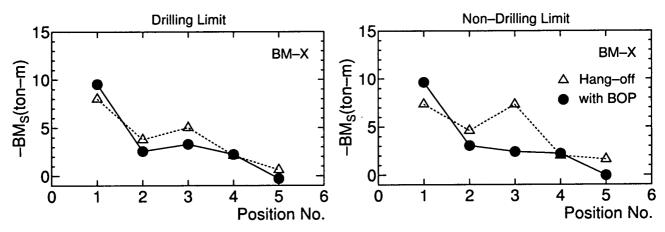


Fig. 8 Static values of bending moment in hanging mode

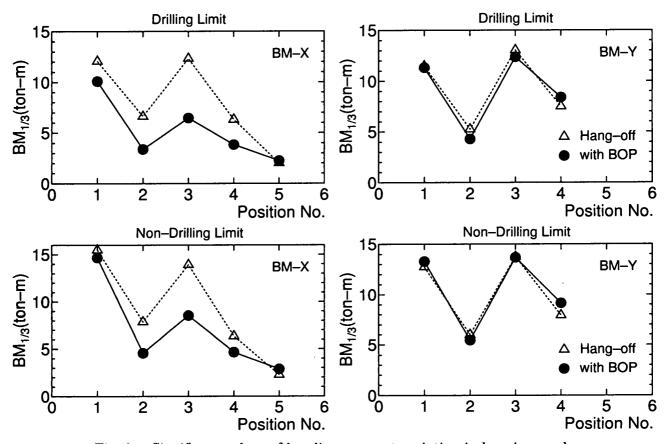


Fig. 9 Significant values of bending moment variation in hanging mode

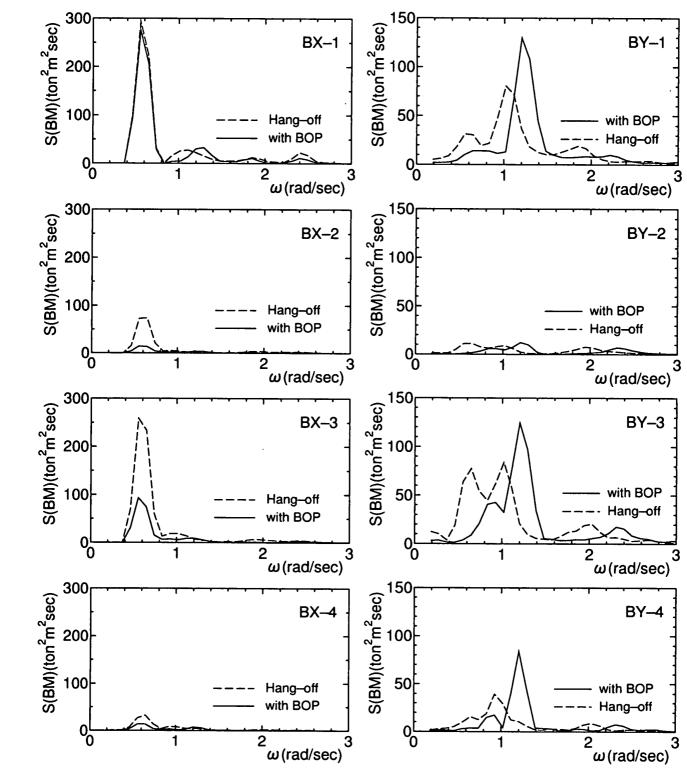


Fig. 10 Power spectra of bending moment variations in hanging mode (non-drilling limit)

あまり現れない。ただし、分布で見ると固有周波数特性 の違いが明瞭に現れる結果となる。

#### 3.3 中間切り離し状態

Non-drilling limit ならびに Max. Environment の 海象条件にて、試験を実施した。

# (1) 変位

Table 5 に X-2,-4 位置におけるライザー主流方向変位の定常値と有義値を、Fig.11 に有義波高ベースで整理したライザー主流方向変位の有義値の比較を示す。参考のため、ハングオフ状態での結果を図示している。Max. Environment では有義波高 15.12m、表層潮流3.0kn であり、air can 上部 (X-2) の横変位の定常値は約 101m、変位の有義値は約 19m と非常に厳しいものとなる。しかし、有義波高 6.52m(Non-drilling 状態)では、ハングオフ状態における変動よりも中間切り離し状態における変動の方が小さいことが分かる。

Table 5 Static and significant values of displacements in free-standing mode

Environment		static	significant
Non-drilling	(X-2)	24.37m	3.51m
Do.	(X-4)	17.75m	2.44m
Max. Env.	(X-2)	100.98m	19.43m
Do.	(X-4)	68.70m	12.28m

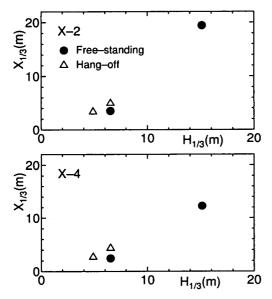


Fig. 11 Significant values of riser displacement in free-standing mode

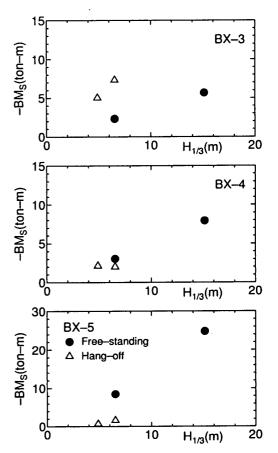


Fig. 12 Static values of bending moment in free-standing mode

# (2) 曲げモーメント

Fig.12 に中間切り離し状態における曲げモーメント定常値の計測結果を示す。air can 下部 (BX-3) での曲げモーメントは小さなものであるが,ライザーの下端に行くに従って値が大きくなる。特に,有義波高15.12m(Max. Envi. 状態) における最下端部 (BX-5)での曲げモーメントは 25ton-m とかなり大きな値となっている。

Fig.13 に中間切り離し状態における曲げモーメント変動の計測結果を示す。最下端部 (BX-5) を除くと,同一有義波高時  $(H_{1/3}=6.52\mathrm{m})$  におけるハングオフ状態での曲げモーメントの 20%程度の大きさである。有義波高  $15.12\mathrm{m}$  では,Fig.11 に示したように,X-2,-4 で大きな変位の変動が計測されているものの,そのときの曲げモーメント変動はそれほど大きなものではない。ライザー全体としては大きく動揺しているものの,局部的なライザー変位の変動は小さく,曲げモーメント変動は大きくならないものと考えられる。下端部での曲げモーメント変動は,ハングオフ状態と比べると大きくなるが,最悪環境状況下においても,憂慮するほどの大きさではない。

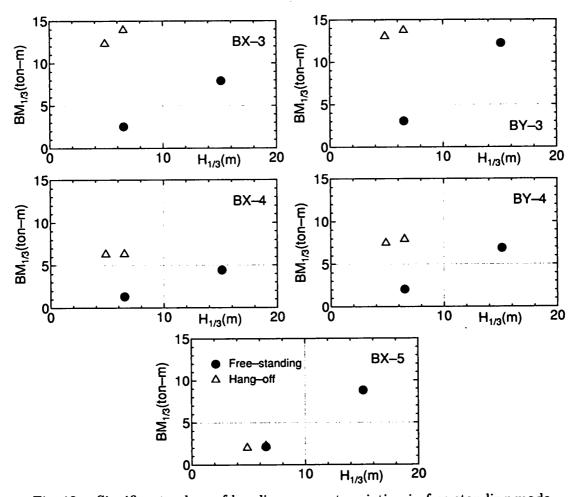


Fig. 13 Significant values of bending moment variation in free-standing mode

#### 4. 結 言

長さ約 750m 相当の中間切り離しライザー模型を用いた不規則波中水槽試験の概要とライザー変位、曲げモーメントに関する計測結果について報告した。得られた知見をまとめると次の通りである。

- (1) 掘削時,下端切り離し時,中間切り離し時といった3つの状態において,潮流(波ならびに強制加振)の方向に対し横方向に大きな曲げモーメントが発生し,その変動有義値は,主流方向に生じるものと同等もしくはそれ以上の大きさであることが分かった。これは,温励振によるライザー横方向の振動(VIV)によると考えられる。
- (2) 掘削状態において、air can 付きライザーの曲げ モーメント変動は、通常ライザーのそれよりも、 場所によっては 20~30%大きい。また、air can の存在は、VIV の影響を増幅させるため、横方 向の曲げモーメント変動が増加する。
- (3) 下端切り離し状態において、下端部重量が減少すると、主流方向の曲げモーメント変動は増加する。

- 一方,横方向の曲げモーメント変動は,下端部重 量の違いにより,周波数に対する特性が変化する ものの,その有義値はあまり変化しない。
- (4) 中間切り離し状態において、最悪環境条件  $(H_{1/3}=15.12 \mathrm{m}$ 、表層潮流  $3 \mathrm{kn}$ )では、ライザー上部の air can 位置は  $12 \sim 20 \mathrm{m}$  程揺れるものの、曲げモーメント変動は比較的小さな値にとどまる。ただし、静的な曲げモーメントが比較的大きい点に留意する必要がある。

本水槽試験により、著者等が提案している中間切り離し ライザーの挙動に関する特徴が、VIV によるライザーへ の影響を含め、把握できたと考えられる。今後は、VIV の影響を考慮したライザー挙動計算法について検討する 必要があると考える。その上で、挙動計算法を用いなが ら、air can 形状やライザー浮力体配置の最適化を行う こととしたい。

# 辩 辞

本論文は、石油公団、日本海洋掘削、三井造船、三菱重工業の共同で行われた研究成果をもとにとりまとめたも

のであり、研究に際し関係各位から有益な討論を頂きま した。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 安川 宏紀, 尾崎 雅彦, 田辺 明生: ハングオフ状態 における大水深ライザーの張力変動と波高限界, 日本造船学会論文集第 182 号 (1997), pp.187-198.
- Ohashi, M., Kogure, E., Tanabe, A. and Ishida, K.: Near Surface Disconnectable Drilling Riser System Investigation, OMAE (1997), Vol.I-B, Offshore Technology, ASME.
- Kogure, E., Ohashi, M., Urabe, S. and Tanabe, A.: Applications of a Near Surface Disconnectable Drilling Riser System in Deepwater, SPE Paper Number47828, IADC/SPE Asia Pacific Drilling Conference (1998), Jakarta.
- 4) 安川 宏紀,尾崎 雅彦,小暮 栄治,大橋 正人, 石田 浩三,平山 裕章:中間切り離しライザーの 挙動解析,日本造船学会論文集第 189 号 (2001), pp.241-250.
- 5) 前田 久明, 諸岡 一之: 多方向波中におかれた浮体の挙動に関する研究(第2報)-ライザー管と浮体との相互干渉-, 日本造船学会論文集第161号(1987), pp.159-172.

# A-1 潮流と波のキャリブレーション結果

Fig.14に表層で 1.75kn をターゲットにした場合の潮流の深さ方向分布を示す。目標の潮流分布と水槽試験における計測流速値との間に差異が認められるが、これ以上の精度で所期の分布に一致させることは困難であった。

実験で使用される波は、ライザー模型が無い状態でキャリブレーションされ、実験中模型が位置するところの特性を記録した。Table 6 に不規則波のキャリブレーション結果を示す。目標 (Target) に対し、実用上の精度で一致している。

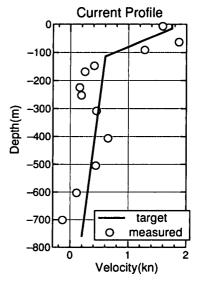


Fig. 14 Current profile

Table 6 Irregular wave calibration results

Environment		Target	Measured
Drilling limit	$(H_{1/3})$	4.88m	5.0m
Non-drilling	$(H_{1/3})$	6.52m	6.3m
Max Env.	$(H_{1/3})$	15.12m	15.1m
Drilling limit	$T_P$	9.94sec	9.9sec
Non-drilling	$(T_P)$	10.93sec	10.7sec
Max Env.	$(T_P)$	15.70sec	15.3sec