

ハングオフ状態における大水深ライザーの変動張力と波高限界

正員 安川 宏 紀* 正員 尾崎 雅彦*
田辺 明 生†

Tension Variation and Limiting Wave Height of a Deep Sea Drilling Riser
in Hang-Off Mode

by Hironori Yasukawa, *Member* Masahiko Ozaki, *Member*
Akio Tanabe

Summary

The wave spectral analysis technique is applied to predict the limiting wave conditions for a deep sea drilling riser in the hang-off mode. In this mode, the riser is disconnected from the subsea BOP stack, hangs from the riser tensioner wires, and the top of the riser moves with the drilling vessel. The limiting wave height then, is the highest wave which does not cause compression in the top of the riser. Calculation results are presented showing the limiting wave height as a function of averaged wave period for a 2,000 m long deep sea riser. This method is then verified through comparisons with results of calculations performed using the time domain method in response to a random sea. Additionally, the influences of internal fluid mass in the riser and the associated fluid friction on the limiting wave height are discussed. Finally, applications of the method to the analysis and design of deep sea drilling risers are presented.

1. 緒 言

海洋石油開発の対象は深水域へと進展しており、現在、水深 2,000 m の深海底を掘削する石油生産向けライザーの研究開発が行われている¹⁾。また、海洋底の科学調査のための深海掘削用の 4,000 級ライザーの開発も行われている²⁾。このような水深 2,000 m を超える深海底を掘削するためのライザーシステムを有する掘削船が、稼働中に突然の台風発生や針路変更などによって予期せぬ波浪環境の悪化に遭遇した場合には、掘削船上にライザーパイプを揚収する時間的な余裕が持てないため、ライザー下端を掘削坑口から切り離し、掘削船からライザーを吊り下げたままのハングオフ状態にて荒天をやり過ごす可能性があると考えられている。そのような場合にも十分な強度を確保したライザーシステムを設計する必要がある。

水深 2,000 m を超えるような大水深ライザーのハングオフ状態においては、潮流や掘削船の前後揺れ(左右揺れ)に対する曲げは相対的に小さいため、ライザー自身の重量に加えて掘削船の上下揺れにもとづく変動張力が第一の荷重要因となる。本論文では、ライザーの曲げによる荷重成分は無視し、ライザーの軸方向の荷重、すなわち張力成分についてのみ考えることにする。

従来の数 100 m 程度のライザーと比べて大水深ライザーでは以下のような理由で変動張力の影響が大きくなる。

- テンション能力やフックロードの制限から浮力体を付設して静的な張力増を抑えることになるが、質量はむしろその分増大するので、慣性力に起因する変動張力が大きくなる。
- ライザーの全長が増大するとともに、ライザーの縦振動の固有周期が長くなり、実海面の波浪の周期に近づくため、変動張力は動的に増幅される^{3,4)}。

変動張力が大きいと、静的張力との和による過大な張力によってライザーの破損が生じるおそれがあり、また一方で、静的張力との差で負の張力(圧縮)が発生すると、ライザーが掘削船を突き上げたり、ライザーに座屈が生じたりするおそれがある。従って、最大変動張力を合理的に予測し

* 三菱重工業(株)長崎研究所

† 石油公団石油開発技術センター

原稿受理 平成 9 年 7 月 8 日

秋季講演会において講演 平成 9 年 11 月 14, 15 日

た上で静的張力を適正に設定することが、より大水深あるいはより過酷な海象の海域での稼働を実現する鍵をにぎることになる。

従来の比較的浅い水深で用いられるライザーの設計では、掘削時の下端結合状態のライザーのたわみ挙動予測に重点がおかれ、ハングオフ時のライザー挙動予測もその延長上で取り扱われていることが多いようである。すなわち、掘削船の波浪中動揺の最大値は波の不規則性を考慮に入れて合理的に推定するものの、ライザー挙動解析では波や船体動揺を規則波中のものに置き換えて計算している（例えば、文献⁹⁾）。しかし、いわゆる設計波法と呼ばれるこのような解析手法では、ハングオフ時の変動張力を評価するのに重要なライザー縦振動の固有周期付近での動的増幅（選択共振）の影響を適切に考慮できない。この問題はライザーが長くなるほど重要になる。ハングオフ時の最大変動張力を合理的に予測し、ライザーシステムに対する波高限界（以下、単に波高限界と呼ぶ）を把握する方法を開発する必要がある。

本論文では、スペクトル法をベースとしたハングオフ時大水深ライザーに作用する最大変動張力の予測法ならびにライザー上端部に作用する負の張力発生を判定基準とした波高限界の計算法を提案する。既に掘削時のライザー応力解析等にスペクトル法の適用が行われているが⁹⁾、ハングオフ時のライザー変動張力ならびに波高限界の計算への適用例は見あたらないようである。本計算法を用いて、波高限界に及ぼすライザーパイプ内の流体質量や縦方向の流体抵抗係数の影響、さらにはライザー設計への応用例として、波高限界に及ぼすライザー長、ライザー水中重量、ライザー外径等の影響について検討する。

2. ライザーハングオフ時の波高限界

波高限界の計算法を考えるにあたって、次の仮定をもうける。

- ライザー上端部の変動張力は規則加振振幅に比例する（線形仮定）
- 船体上下揺れによる変動張力のみを考える
- ライザーの傾斜・たわみの影響は無視する

以上の仮定の下で、ライザー縦振動の周波数応答の線形重ね合わせによるいわゆる短期予測を行う。

2.1 波高限界の計算法

計算の手順は以下に示すとおりである。

(1) ライザー上端部を上下方向に単位振幅で強制的に加振したときのライザー上端部変動張力振幅 T_F を求める。この計算法として種々のものが考えられるが（例えば、文献^{4,9)}）、ここでは、ライザー設計時における試行錯誤に迅速に対応できる手法という観点から、Appendix-1 に示すライザーを数個の分割された集中質量でモデル化した簡便な計算法を用いるものとする。

(2) 規則波中における単位波振幅当たりの掘削船の上下揺れ振幅 Z_a を別途求めておく。

(3) (1)と(2)から、単位波振幅当たりのライザー上端部変動張力振幅 T_a を求める。 T_a は T_F と Z_a の積で計算され、周波数毎、掘削船に対する波方向毎に求める。

(4) (3)と単位有義波高当たりの波スペクトル S' を用いて、不規則波中のライザー上端部変動張力のエネルギースペクトルの計算を行い、単位有義波高当たりの変動張力の有義値 $T'_{F1/3}$ および最大値 T'_{Fmax} を求める（肩字'が単位有義波高当たりの値を意味する）。本論文では、波スペクトル表示式として、ISSC (1979) 波スペクトルを用いることとし、方向分布として、 $\cos^2$ 型を仮定した。

$$S'(\omega, \chi) = (2/\pi) \cos^2 \chi S(\omega) / H_{1/3}^2 \quad (1)$$

$$S(\omega)^2 / H_{1/3}^2 = 0.111 \omega_1^{-1} (\omega / \omega_1)^{-5} \exp[-0.44(\omega / \omega_1)^{-4}] \quad (2)$$

ここで、 $\omega_1 = 2\pi/T_{01}$ であり、 T_{01} は平均波周期である。 $H_{1/3}$ は有義波高、 χ は波方向であり、180 deg を正面向波と定義する。また、 T'_{Fmax} と $T'_{F1/3}$ の関係については、簡便に $T'_{Fmax} = 2 \cdot T'_{F1/3}$ とした。

(5) 変動張力は波高に比例するとした線形の仮定の下では、変動張力の最大値が静的な釣り合い張力 T_s を超えた場合に負の張力が発生すると考えられる (Fig. 1 参照)²⁾。この負の張力が発生する時の有義波高を波高限界 H_l とみなす。すなわち、波高限界 H_l は変動張力の最大値が静的な釣り合い張力と等しくなるときの有義波高であり、次式で計算できる。

$$H_l = T_s / T'_{Fmax} \quad (3)$$

ただし、ここではライザーの引っ張り強度は、ライザー水中重量の2倍以上あるものとした。そうでない場合、負の張力の発生以前にライザーの破損が生じる。

2.2 計算対象のライザー要目と掘削船

次に、変動張力や波高限界の計算対象とするライザーの要目と設計条件について述べる。ライザー要目は以下の通りとした。ただし、ここでは波高限界の計算例を示すことが目的であるため、掘削状態における挙動を含めた最適なライザー設計はまだなされていない。

- ライザー長：2,000 m
- 外径：21 inch (0.526 m)、内径：19.5 inch (0.488 m)
- 材質：鋼
- 浮力体密度：0.5、浮力体外径：0.85 m
- 浮力体長さ上端より：1,050 m
- 下端部付加重量：120 ton (空中)、100 ton (水中)
- 全質量（内部流体考慮せず）：80 ton・s²/m
- 全水中重量：330 ton

掘削船は vessel タイプとし、Table 1 に示す要目を仮定した。Fig. 2 に波方向 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 deg における規則波中での上下揺れ応答特性を示す。船速は 0 である。船体運動はストリップ法 (STF 法) を用いて計算し

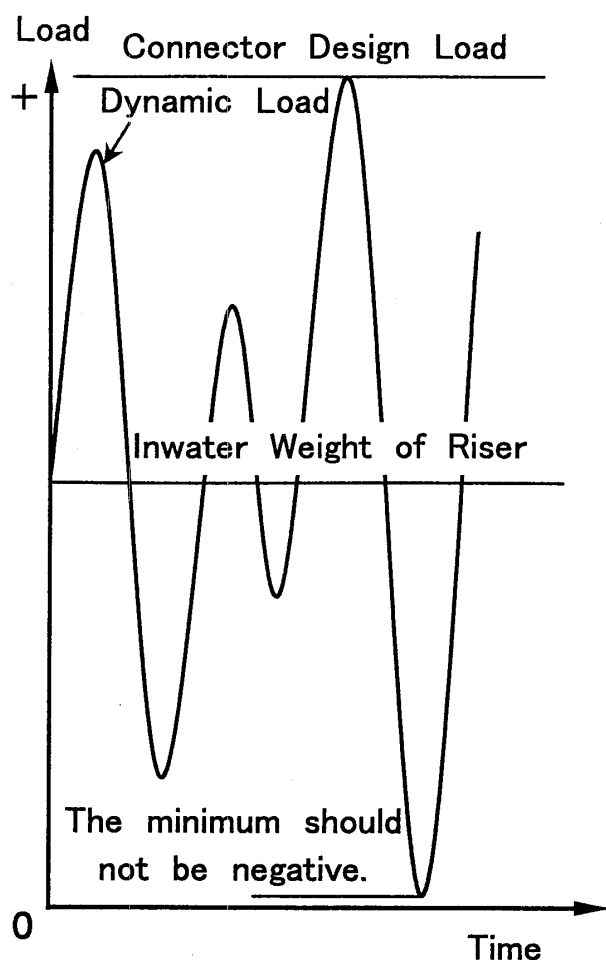


Fig. 1 Required riser tension tolerance while hang-off mode

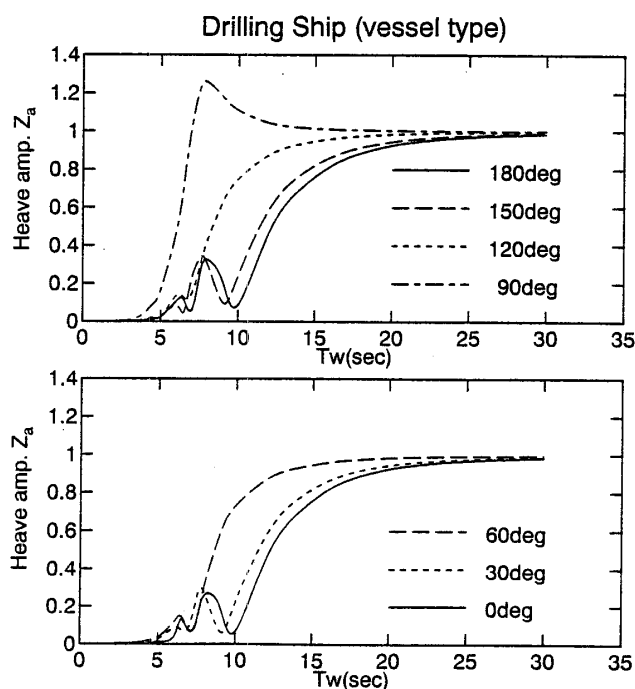


Fig. 2 Heave RAO for a drilling vessel

Table 1 Principal particulars of a drilling vessel

Ship Length L_{pp}	150m
Breadth B	27m
Depth D	11m
Full load draft d	8m
Displacement	abt.20,000ton

た。

2.3 ライザー変動張力の計算：基礎仮定の検証

実際のハングオフ状態におけるライザー変動張力には、ライザー自身の運動に伴う流体抵抗の作用、掘削船の左右・前後揺れ等による高次の変動張力発生といった非線形な影響が考えられる。波高限界の計算法では、線形重ね合わせを仮定したスペクトル法をベースとした手法を採用しているため、この基礎仮定が成り立つ範囲を明確にしておく必要がある。ここでは、Appendix-1 に示したライザー変動張力の簡易時刻歴計算法ならびに有限要素法による非線形時刻歴ライザー挙動解析手法（プログラム名：MARIAN）⁷⁾を用いて、ライザー変動張力の時刻歴計算を実施し、本仮定の妥当性、本計算法の適用範囲について検討を行った。

2.3.1 流体抵抗による非線形影響

ライザー縦方向の流体抵抗は速度の2乗に比例する非線形な項である。この流体抵抗が変動張力に及ぼす非線形影響を調査するため、Appendix-1 に示した簡易計算法を用いて、ライザー上端部変動張力の時刻歴計算を行った。Fig. 3 にライザー縦振動の固有周波数から20%大きい周波数で上端部を加振した場合の変動張力の時刻歴計算結果を示す。浸水面積ベースのライザー縦方向流体抵抗係数 C_f は、0.0015, 0.0045 の2種類変更した。この抵抗係数の大きさはAppendix-2 を参照に推定したものである。計算結果には、変動張力の波形のつぶれや正の値と負の値のピーク絶対値に差異が出るといった非線形な傾向はほとんど見られない。少なくとも、抵抗係数 C_f が0.0045程度の大きさであるのならば、流体抵抗にもとづく非線形影響はほとんど見られず、ライザー上端部の変動張力は規則加振に対し線形的に応答することが分かった。

2.3.2 掘削船の前後揺れの影響

次に、ライザー変動張力に及ぼす掘削船の前後揺れ（左右揺れ）の影響について検討するため、ライザー上端部を上下方向だけでなく前後方向にも規則的に加振させ、そのときのライザー上端部に作用する張力をMARIANを用いて計算した。Figs. 4, 5 に船の前後揺れを考慮したときと考慮しないときのライザー上端部張力の時刻歴計算結果を

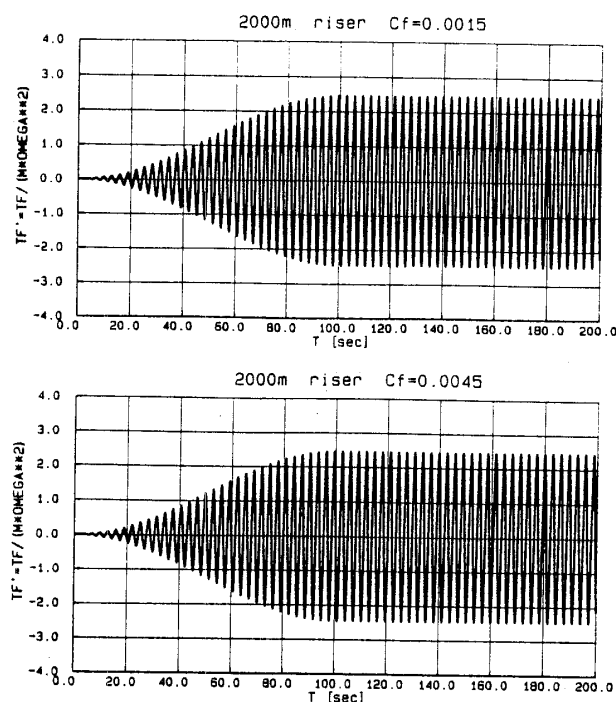


Fig. 3 Comparison of tension variations with different longitudinal resistance coefficient in time domain calculation (upper: $C_f=0.0015$, lower: $C_f=0.0045$)

示す。Fig. 4 は上下揺れ振幅が 2.0 m の場合、Fig. 5 は上下揺れ振幅が 4.5 m の場合である。

前後揺れがない場合には、ライザー変動張力の振幅は上下揺れ振幅にほぼ比例していることが確認できる。上下揺れ振幅が 2.0 m の場合には、前後揺れによる影響はほとんど見られず、上下揺れが無い場合の結果とほぼ同じとなる。一方、負の張力が発生寸前となっている上下揺れ振幅が 4.5 m の場合には、振幅 4.0 m の前後揺れの影響により、張力の波形において上端部が尖り下端部はつぶれたものとなっている。これは、前後揺れが伴うと、正弦的な上下揺れに対して張力は正弦的な応答を示さないという、いわゆる非線形応答が生じていることを意味する。このような現象は、掘削船の上下揺れと前後揺れとの干渉影響により、高次の変動張力成分が発生したと考えられる。まとめると、上下揺れに前後揺れが伴うと、一般的には、スペクトル解析を行うための線形重ね合わせの仮定が成り立たなくなり、その場合には本波高限界の計算法は適用できない。

2.4 波高限界の計算結果

次に、2.2 で述べたライザーを対象に、波高限界の計算を行った。Fig. 6 に周期ベースの単位振幅当たりのライザー変動張力特性の計算結果を示す。図中、変動張力振幅 T_F は $m\omega^2$ (m はライザーの質量、 ω は加振周波数) を用いて無次元化している。本ライザーは、周期 2.5 sec の付近に縦振動の固有周期があり、Appendix-1 に示した簡便な計算法

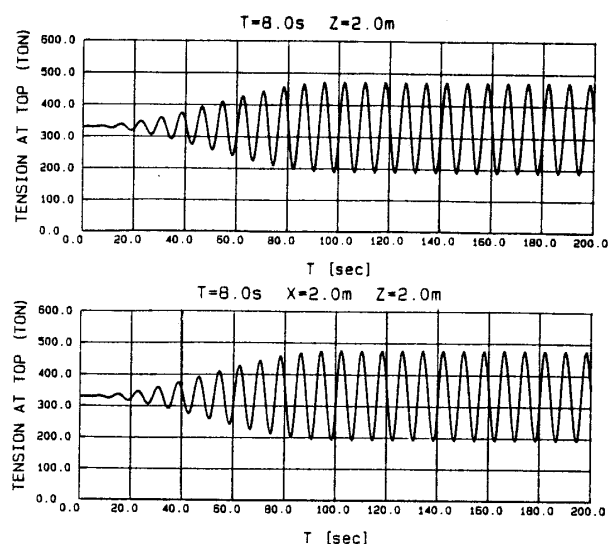


Fig. 4 Comparison of tension variations with heave amp.=2.0 m in time domain calculation (upper: surge amp.=0, lower: surge amp.=2.0 m)

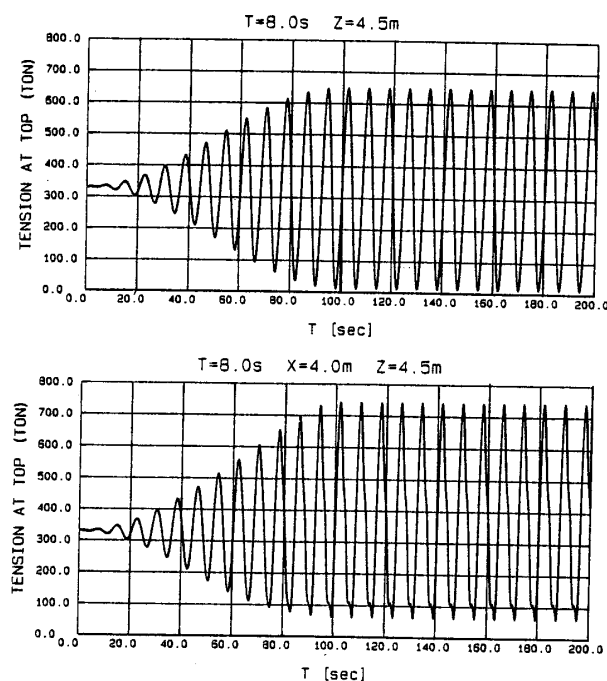


Fig. 5 Comparison of tension variations with heave amp.=4.5 m in time domain calculation (upper: surge amp.=0, lower: surge amp.=4.0 m)

による結果は、MARIAN による計算結果と良い一致を示していることが分かる。次に、Fig. 7 に各波方向における短波頂中での単位有義波高当たりライザー上端部変動張力の有義値 $T_{F1/3}$ を示す。平均波周期 6~8 sec の位置にピークがある。波方向については、横波になるほど船体運動が大きくなりライザー変動張力の有義値も大きくなる。

Fig. 8 に波高限界の計算結果を示す。例えば、波方向 150

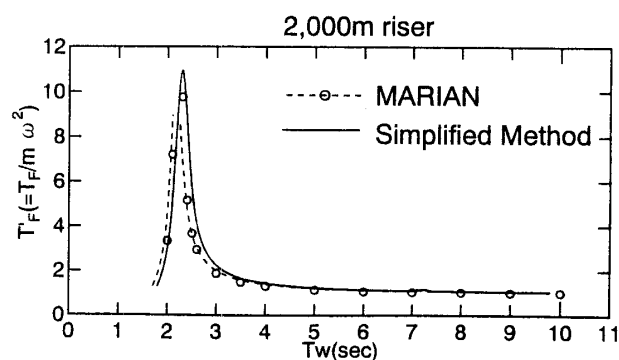


Fig. 6 Calculated results of RAO of tension variation per unit heave amplitude

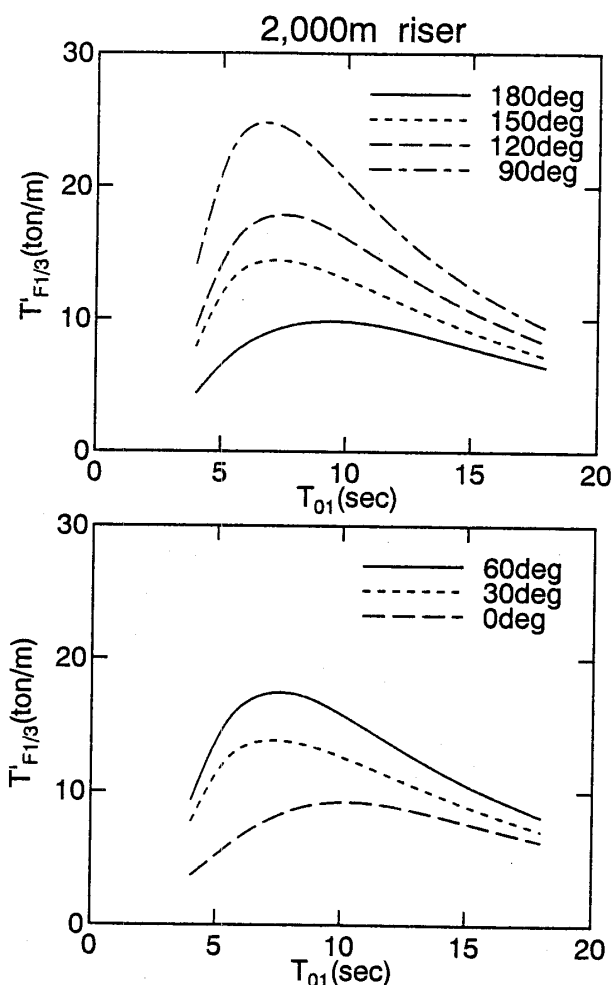


Fig. 7 Calculated results of significant value of tension variation

deg (斜め迎波) の場合, 平均波周期 7 sec で単位有義波高当たりのライザー変動張力の有義値は約 15 ton, 最大期待値は約 30 ton である。ライザーの水中重量 T_s が 330 ton であることから, 負の張力の発生を操作限界とみなすと, 波高限界は $330/30 \sim 11.0$ m となる。

本計算結果の妥当性を確認するため, MARIAN による

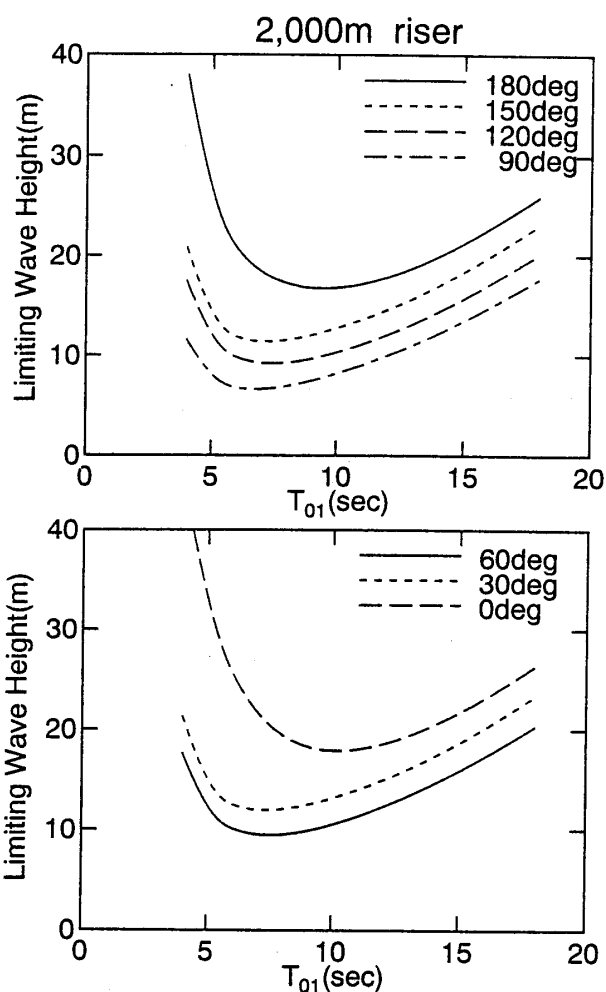


Fig. 8 Calculated results of limiting wave height

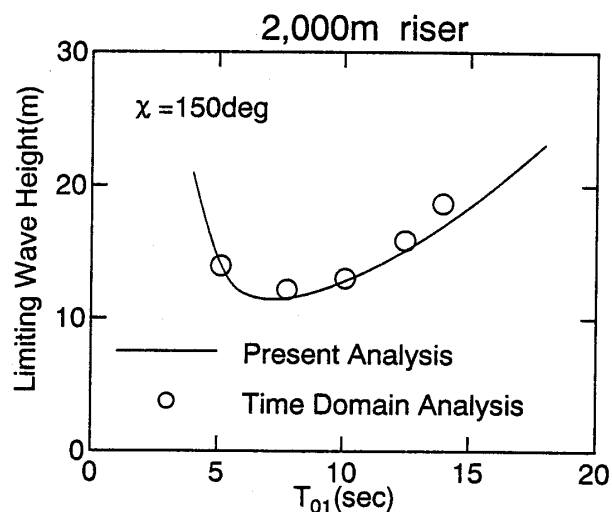


Fig. 9 Comparison of limiting wave height (wave direction: 150 deg)

不規則時刻歴解析 (Appendix-3 参照) にもとづく波高限界の計算結果と比較を行った。MARIAN による不規則時刻歴解析では, 船の前後揺れ, 左右揺れの影響も考慮した

め、上下方向だけでなく、前後、左右方向にもライザー上端部を加振させており、その上でライザー上端部において負の張力が発生しないような波高限界を求めた。Fig. 9に計算結果の比較を示す。両者はモデルも計算手法も全く異なるにもかかわらず、限界波高の計算結果は良く一致している。本論文で提案した波高限界計算法の妥当性が示されたと言える。

3. ライザー内部流体の取り扱いの違いによる波高限界の変化

実機との縮尺比等を正しく考慮したライザー模型を用いた水槽試験の実施は非常に困難であるため、ライザーシステムの設計・検証は、通常ライザー挙動の理論計算を通じて行われる。従来のライザー変動張力の計算においては、ライザーパイプ内の海水の運動影響を取り扱うことができないため、適当な内部流体質量や流体抵抗係数を仮定して取り扱っている。しかし、その具体的な取り扱い方法に定説はなく、これらの設定如何によっては、波高限界の計算結果が大きく変化する可能性がある。先に示した計算例では、パイプ内部の海水質量はライザーパイプに完全に付加したものとして取り扱っている。ライザー内部流体の取り扱いの違いによる波高限界の変化を設計の立場からクリアにしておく必要がある。

3.1 内部流体質量の影響

ライザー内部の流体質量の取り扱いの違いによる変動張力や波高限界の変化を把握するため、次に示す4ケースについて計算を行った。なお、いずれの場合にも浸水面積ベースのライザー縦方向流体抵抗係数を $C_f=0.0015$ とした。

- (1) 内部流体を質量として考慮しない場合 (M-1)
- (2) 内部流体の50%だけを付加質量としてライザー内で一様に分布させた場合 (M-2)
- (3) 内部流体全部を付加質量としてライザー内で一様に分布させた場合 (M-3)
- (4) 内部流体全部をライザー下端についたマスとみなした場合 (M-4)

Sparks は実機試験と理論解析の比較を通じて、内部流体はライザーパイプの質量として考慮しない方が両者の一致度が良い方向にあると報告しているが結論は先送りしており⁹⁾、今のところ定説とはなっていない。麻生らは内部流体全部を付加質量としてライザー内で一様に分布させた計算(すなわち M-3)を行っている⁸⁾。Miller は内部流体全部をライザー下端についたマス(すなわち M-4)とみなすモデル化を行っている¹⁰⁾。

Table 2 に内部流体質量の取り扱いの違いによる縦振動固有周期の比較、Fig. 10 に内部流体質量の取り扱いの違いによるライザー変動張力特性と波高限界の変化を示している。内部流体を付加質量として大きく考慮するにつれて

Table 2 Effect of inside fluid mass on natural frequency with respect to longitudinal vibration

	ω	$T_w(\text{sec})$
M-1	3.09	2.03
M-2	2.77	2.27
M-3	2.53	2.48
M-4	2.11	2.98

Table 3 Effect of fluid resistance on tension variation at natural frequency

C_f	$T_F/m\omega^2$
0.0015	12.0
0.0030	8.9
0.0045	7.3

固有周期が長くなり、ライザー下端についたマスとみなすとさらに固有周期が長くなる。固有周期が長くなると変動張力の有義値は大きくなる傾向があり、内部流体を付加質量として大きく考慮するにつれて波高限界は小さくなること分かる。M-1の限界波高はM-4の約1.5倍である。

内部流体の取り扱いに関して定説がない現状においては、設計の観点からはM-3あるいはM-4のように内部流体全部を付加質量として考慮の方が安全と考えられる。内部流体質量の取り扱い方法を明確にすることが今後さらに大水深化に向かうときの重要な課題である。

3.2 縦方向流体抵抗の影響

次に、縦方向流体抵抗が固有周波数付近の変動張力に及ぼす影響について計算を行った。内部流体については、その全部を付加質量としてライザー内で一様に分布させるもの(すなわち M-3)とした。抵抗係数 C_f の違いによる影響を見るため、 $C_f=0.0015, 0.0030, 0.0045$ の3種類変化させた計算を行った。

Table 3 に縦振動共振位置における変動張力の比較、Fig. 11 に流体抵抗を変化させた場合のライザー変動張力特性と波高限界の変化を示す。計算結果から、固有周波数付近では抵抗係数によって変動張力の値が顕著に異なり、抵抗係数が小さいほど変動張力のピーク値が大きくなること、しかし、固有周波数付近以外では抵抗係数による影響はほとんど見られないこと、また抵抗係数を変化させても、

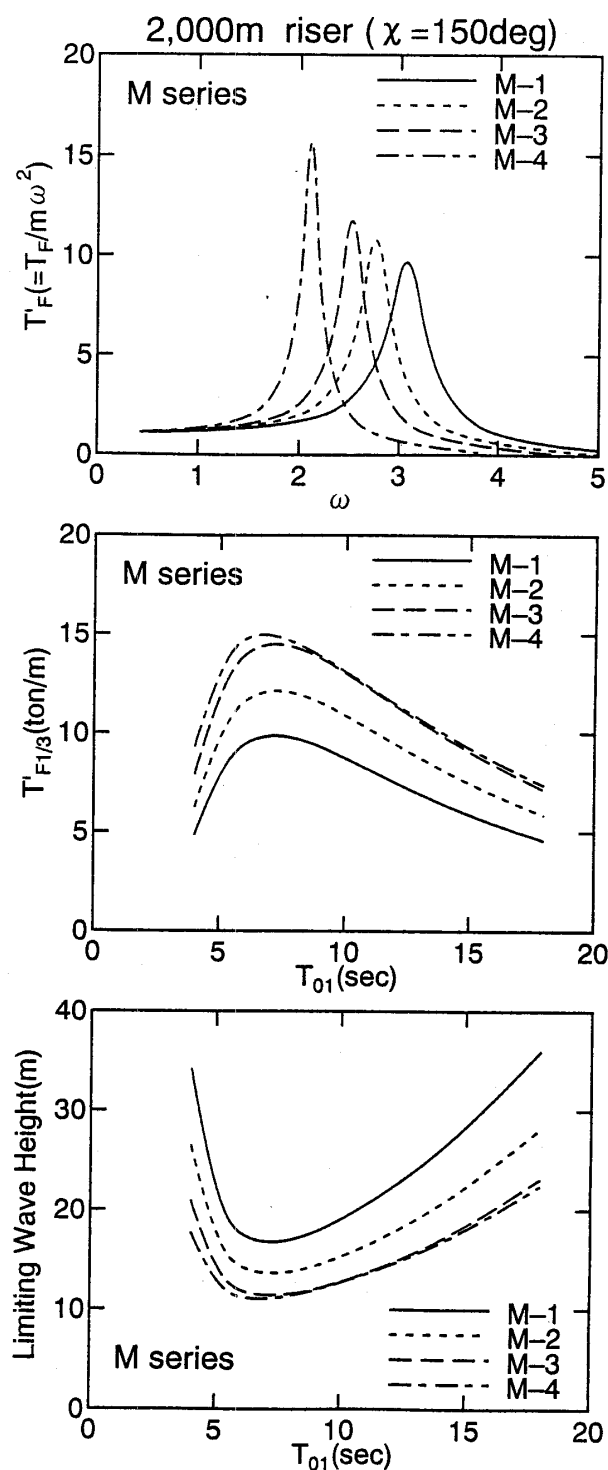


Fig. 10 Effect of internal fluid mass in the riser on tension variation characteristics and limiting wave height (upper: RAO of tension variation, middle: significant value of tension variation, lower: limiting wave height)

固有周波数位置にはほとんど影響を及ぼさないことが分かる。これらの結果より、縦方向流体抵抗係数の違いによって、変動張力の有義値ならびに波高限界はほとんど変わらないことが分かる。ここで対象とした2,000 mクラスのラ

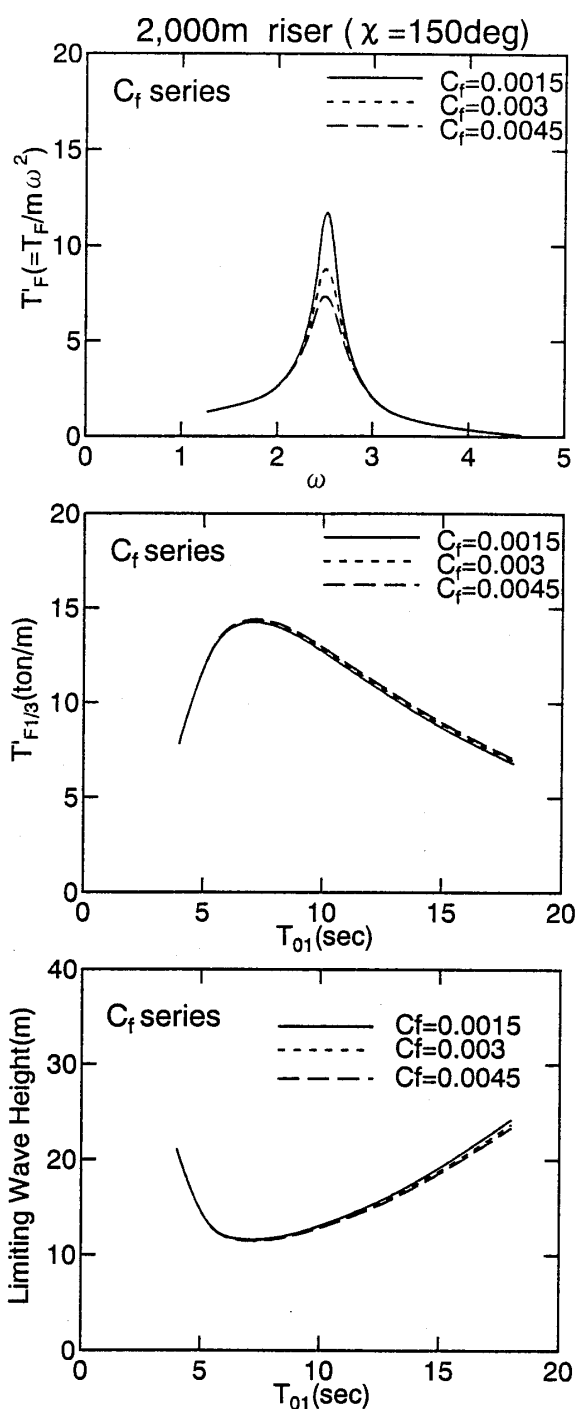


Fig. 11 Effect of fluid friction resistance coefficient on tension variation characteristics and limiting wave height (upper: RAO of tension variation, middle: significant value of tension variation, lower: limiting wave height)

イザーの縦振動固有周期は2.5 sec 付近であり、通常の船体運動の周期よりも短い周期位置にある。そのため、波高限界の結果にはその影響がほとんど現れなかったものと考えられる。固有周期がより長くなる2,000 mを越える大水深ライザーの場合には、固有周期近傍の変動張力の値が影

響を及ぼすようになると予想されるため、ここでの結論をそのままは適用できないと考えられる。

4. ライザー設計への応用

上述した方法を用いて、ライザー長や水中重量、ライザー径をシリーズ的に変化させた場合の変動張力や波高限界の計算を実施した。これにより、ライザー要目や重量等の変化による波高限界の変化を大局的に捉えることができる。なお計算では、内部流体全部を質量として考慮し、 $C_f = 0.0015$ とした。

4.1 ライザー長の影響

まず、ライザー径、ライザー水中重量は一定とし、ライザー長を1,500, 2,000, 2,500, 3,000 mと変化させた計算を実施した。ライザー長を変化させながら水中重量を一定に保つため、浮力体を増減させた。浮力体はライザー上端部から深さ方向に向かって取り付けるとし、以下では浮力体が付くライザー部分の長さを浮力体長さと呼ぶことにする。Table 4に長さの異なる4種のライザー要目を示す。

Fig. 12に、ライザー長を変化させた場合のライザー変動張力特性と波高限界の計算結果を示す。ライザー長が長くなるにつれて、水中重量は変わらないものの全体質量が大きくなるため、慣性力にもとづく変動張力は大きくなる。それに加えて、ライザー長が長くなるとライザー縦振動の固有周期が長くなり、掘削船の上下揺れが大きくなる周期領域にシフトするため、ライザー張力の有義値は顕著に大きくなる。ライザー長の増大とともに、急激に波高限界が低くなり、ライザーの成立が困難となることが分かる。

4.2 ライザー水中重量の影響

次に、ライザー長、ライザー径は一定とし、ライザー水中重量を230, 330, 430 tonと変化させた計算を実施した。水中重量は浮力体を増減させることによって調整し、ライザーを吊り下げるための最大フック荷重は、ライザー水中重量の2倍以上と仮定した。Table 5に水中重量の異なる3種のライザー要目を示す。

Fig. 13に、水中重量を変化させた場合のライザー変動張力特性と波高限界の計算結果を示す。同じライザー長のまま水中重量を軽くするには、浮力体を多く取り付ける必要があり、浮力体の質量分だけ全体質量が増加するので慣性力が増加し、変動張力が大きくなることにつながる。従って、水中重量が軽いライザーの方がライザー変動張力の有義値が大きくなる結果となる。また、波高限界の計算式(3)式から分かるように、線形応答の仮定のもとでは、波高限界(H_l)は静的なライザー張力(すなわちライザー水中重量; T_s)に比例するため、ライザー水中重量が大きい方が波高が高くなる。以上より、大水深ライザーを成立させるためには、浮力体を少なくして水中重量を大きくすることが有効であり、そのためにはテンショナ容量や最大フック

Table 4 Risers with different length

Riser Length	1,500m	2,000m	2,500m	3,000m	Remarks
Out. Dia./In. Dia.	21/19.5inch	Do.	Do.	Do.	
OD of Float	0.85m	Do.	Do.	Do.	
Length of Float	495m	1,060m	1,610m	2,167m	
Total Mass	58ton s ² /m	80ton s ² /m	102ton s ² /m	124ton s ² /m	excl. inside mass
Total Weight in Sea	330ton	Do.	Do.	Do.	

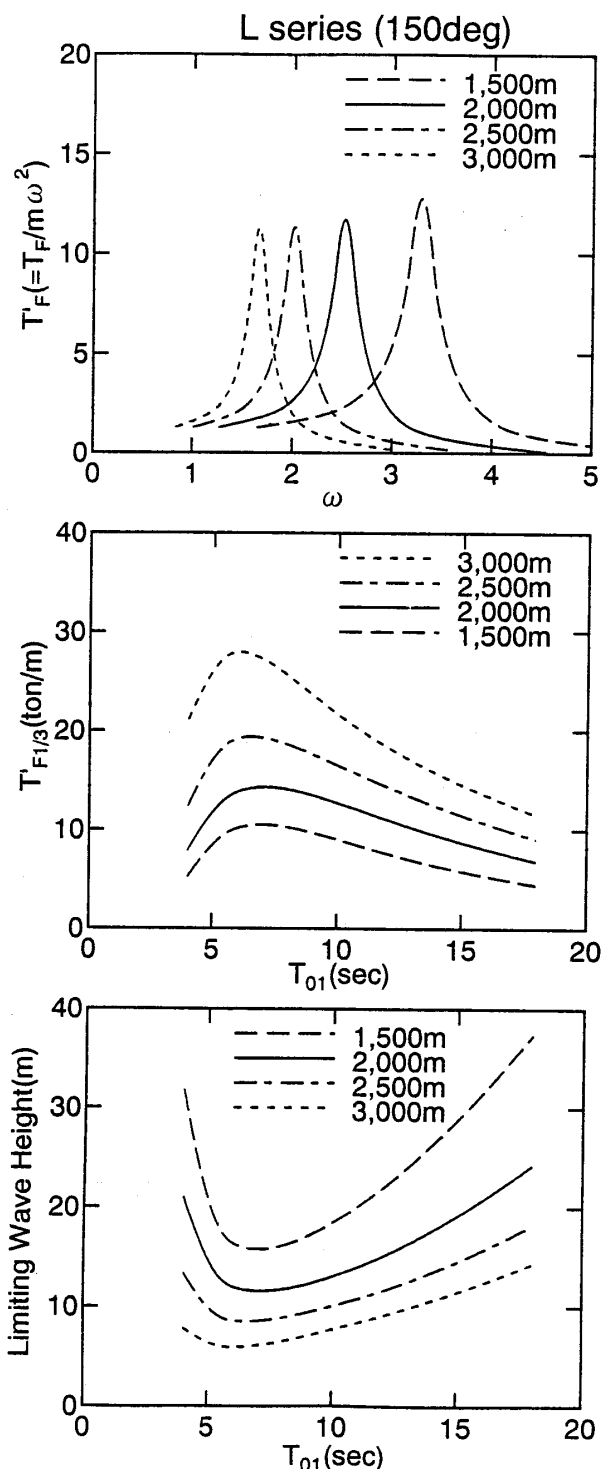


Fig. 12 Effect of riser length on tension variation characteristics and limiting wave height (upper: RAO of tension variation, middle: significant value of tension variation, lower: limiting wave height)

Table 5 Risers with different weight in sea

Total Weight in Sea	230ton	330ton	430ton	Remarks
Riser Length	2,000m	Do.	Do.	
Out. Dia./In. Dia.	21/19.5inch	Do.	Do.	
OD of float	0.85m	Do.	Do.	
Length of float	1,564m	1,050m	541m	
Total mass	89ton s ² /m	80ton s ² /m	70ton s ² /m	excl. inside mass

Table 6 Risers with different diameter of the riser

Out. Dia./In. Dia.	16/14.5inch	21/19.5inch	Remarks
Riser Length	2,000m	Do.	
OD of Float	0.71m	0.85m	
Length of Float	720m	1,050m	
Total Mass	59ton s ² /m	80ton s ² /m	excl. inside mass
Total weight in Sea	330ton	Do.	

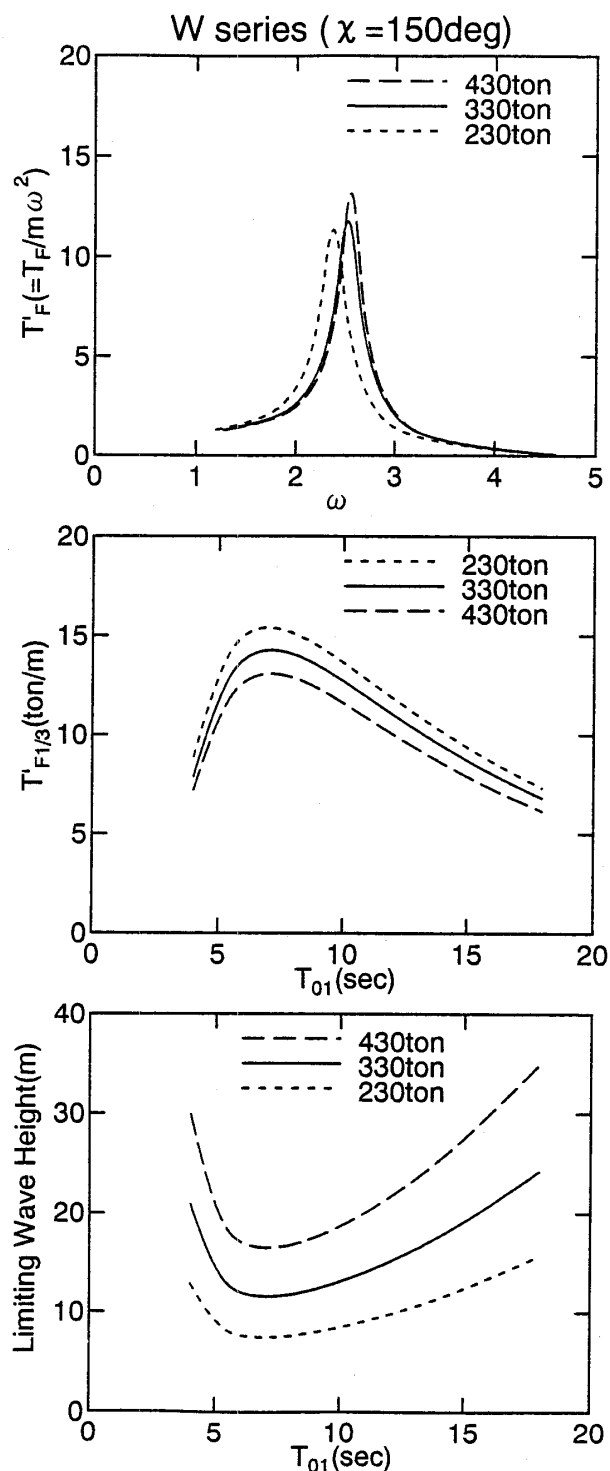


Fig. 13 Effect of riser weight in sea on tension variation characteristics and limiting wave height (upper: RAO of tension variation, middle: significant value of tension variation, lower: limiting wave height)

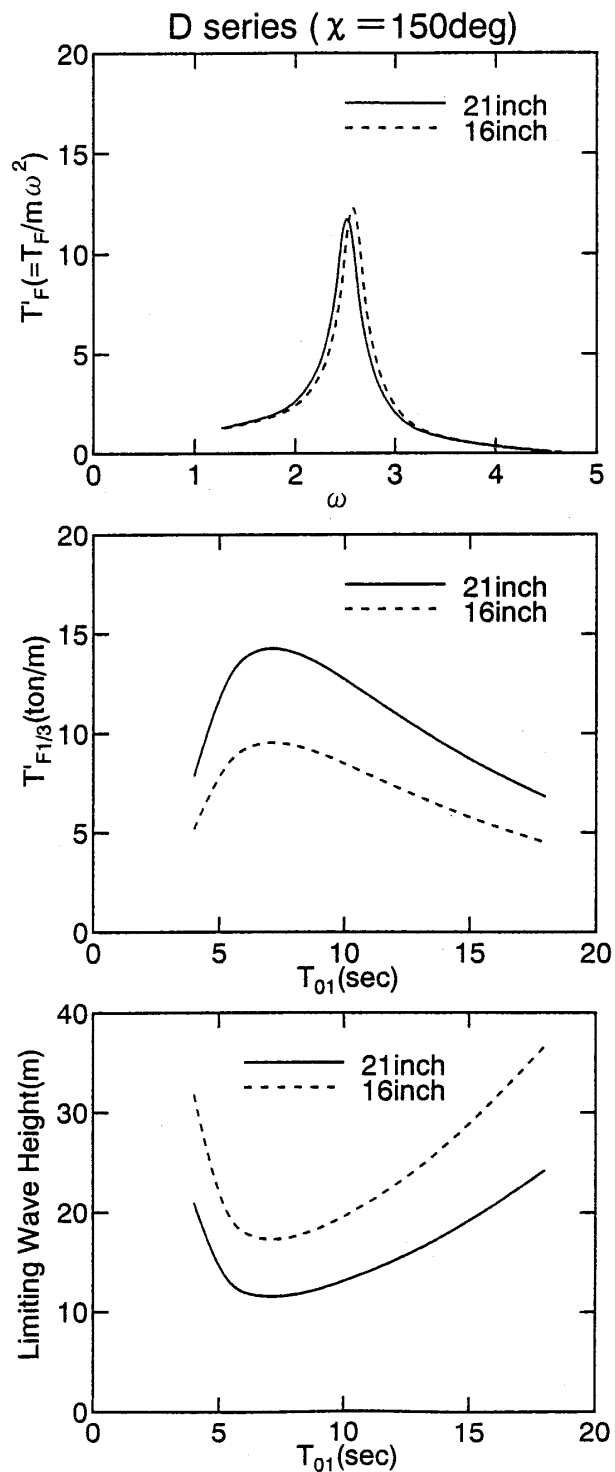


Fig. 14 Effect of riser diameter on tension variation characteristics and limiting wave height (upper: RAO of tension variation, middle: significant value of tension variation, lower: limiting wave height)

荷重を大きくする必要がある。浮力体を多く設け、水中重量を軽くしていくことは、大水深ライザーを成立させるための良い方策では無いことを銘記すべきであろう。

4.3 ライザー径の影響

ライザー長、ライザー水中重量は一定とし、ライザー外径を 21, 16 inch と変化させた計算を実施した。Table 6 に 2 種のライザー要目を示す。Fig. 14 に、ライザー外径を変化させた場合のライザー変動張力特性と波高限界の計算結果を示す。ライザー外径が小さくなるとライザー自身の質量が小さくなる上に、設定された水中重量を保つための浮力体をあまり必要としないため、全質量を小さめに抑えることができる。その結果、ライザー張力の有義値は小さくなり、波高限界は大きくなる。ライザー径を小さくすることは、大水深への適用を可能にするための良い方向であることが分かる。Sparks の Slimline riser のアイデア¹⁾ はこのような考えによるものといえる。

5. 結 言

本研究で得られた成果をまとめると次の通りである。

(1) ハングオフ時のライザー縦振動の固有周期周辺の動的増幅を考慮に入れて最大変動張力ならびに波高限界を推定する簡易計算法を提案し、2,000 m 級ライザーを対象とした波高限界の計算例を示した。有限要素モデルを時刻歴計算する汎用的計算法による結果との比較を通じて、本計算法の妥当性を確認した。

(2) ライザー内部流体の取り扱いが波高限界に及ぼす影響について調査した。その結果、内部流体をライザーの付加質量としてどう考慮するかによって限界波高の計算値が有意に変化すること、現状ではこの取り扱いに関して定説がないため、設計の観点からは内部流体全部を質量として考慮の方が安全と考えられることが分かった。また、2,000 m 級ライザーでは内部流体等による抵抗係数の違いは、波高限界の計算結果にほとんど影響を及ぼさないことが分かった。

(3) ライザー設計への応用例として、ライザー長、ライザー水中重量、ライザー径を変化させた場合の波高限界の計算を実施した。その結果、ライザー長が大きくなるにつれて成立性が顕著に低下する傾向があり、大水深ライザーを成立させるためには、浮力体を減少させて水中重量を増加させ、その分テンション容量や最大フック荷重を大きく取れるようにしたライザーシステムが適切であることが分かった。また径の細いライザーの採用が有効であることが示された。

本計算法は、ライザーの変動張力や波高限界が簡便に計算できるため、試行錯誤が必要なライザー設計の初期段階において最も有効と考えられる。ただし、ライザー設計の最終段階では、ライザーの曲げならびに変動張力の非線形影響を考慮すべきであり、Appendix-3 に示した非線形時刻

歴解析による強度照査が必要と考える。

今後の課題を列挙すると次のようになる。

(1) 縦振動の動特性の影響が取り込めるような実機あるいは比較的大規模な模型試験との比較による本計算手法の検証

(2) ライザー挙動に及ぼす内部流体の影響の定量的な把握

謝 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の一部をもとにとりまとめたものであり、研究に際し関係の方々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。また、三菱重工業の著者二人に対し、ライザー掘削について種々御助言を頂いた三菱重工業船舶技術部斎藤良雄氏ならびに磯崎芳男氏、同長崎造船所造船設計部増田和夫氏、同神戸造船所潜水艦部西岡俊二氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田辺明生：TRC における海洋石油開発関連研究、水中線状構造物 workshop、石油公団石油開発技術センター (1996)、幕張
- 2) Takagawa, S.: *Riser Technology and Drilling Operations for OD21*, International Workshop on Riser Technology (1996), Yokohama
- 3) 鈴木英之、吉田宏一郎、石坂智成：大水深ライザーの応答挙動と設計に関する考察、日本造船学会論文集第 181 号 (1997)、pp. 271-279
- 4) Sparks, C. P., Cabillic, J. and Schawann, J. C.: *Longitudinal Resonant Behavior of Very Deep-water Risers*, OTC 4317, Offshore Technology Conference (1982), Houston
- 5) Takagawa, S., Yamamoto, H. and Ishida, S.: *Development of a Deepwater Riser System for Scientific Drilling in the 21st Century*, OMAE-Volume I-B, Offshore Technology, ASME (1995), pp. 281-287
- 6) Connolly, J. T. and Wybro, P. G.: *Riser Analysis Methods: Comparison with Measured Field Data*, OTC 4735, Offshore Technology Conference (1984), Houston
- 7) Ozaki, M. and Yasukawa, H.: *Analysis Method of Behavior of Line Structures in Water and Its Application-Behavior of Cables, Pipes and Chains in Water*, Technical Review, Vol. 30, No. 3, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (1993)
- 8) 麻生和夫、菅 勝重、土岐 仁、森 雅裕：深海における揚鉤管の縦振動、第 9 回海洋工学シンポジウム、日本造船学会 (1989)、pp. 323-330
- 9) Sparks, C. P. and Schawann, J. -C.: *Riser Instrumentation: Deep Water Drilling Campaign Results*, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 107, ASME (1985), pp. 408-414
- 10) Miller, J. E. and Young, R. D.: *Influence of Mud*

Column Dynamics on Top Tension of Suspended Deepwater Drilling Risers, OTC 5015, Offshore Technology Conference (1985), Houston

- 11) Sparks, C. P.: *Riser Technology for Deepwater Scientific Drilling in the 21st Century*, OMAE-Volume I-B, Offshore Technology, ASME (1995), pp. 271-279
- 12) Besançon, O., Sparks, C. P. and Guesnon, J.: *Longitudinal Resonant Behavior of Deepwater Risers Calculated using Recorded Heave Sequences*, OMAE-Volume I-A, Offshore Technology, ASME (1992), pp. 249-256

A-1 変動張力の簡易時刻歴計算法

長大ライザーの縦方向の挙動を記述する簡易モデルとして、Fig. A-1に示すようなばねで連結された5質点モデルを考える。5つの質点は、ライザーを上下に4分割した質量と、LMRP等の下端質量を模擬している。ここで、 x は上下加振変位、 y はライザー上下方向変位、 m はライザー質量、 S はライザー浸水面積、 C_f はライザー浸水面積ベースの抵抗係数、 k はライザーの伸びにもとづくばね定数を表し、それぞれに添え字1, 2, 3, 4, 5を付け5つの質点を区別して表す。 k はライザーの軸剛性とライザー分割長から計算できる。そのとき、運動方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 & \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \\ \ddot{y}_4 \\ \ddot{y}_5 \end{pmatrix} \\
 & + \frac{1}{2} \rho \begin{pmatrix} S_1 C_{f1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 C_{f2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 C_{f3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_4 C_{f4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_5 C_{f5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \\ \dot{y}_5 \end{pmatrix} \\
 & \times \begin{pmatrix} |\dot{y}_1| \dot{y}_1 \\ |\dot{y}_2| \dot{y}_2 \\ |\dot{y}_3| \dot{y}_3 \\ |\dot{y}_4| \dot{y}_4 \\ |\dot{y}_5| \dot{y}_5 \end{pmatrix} \\
 & + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

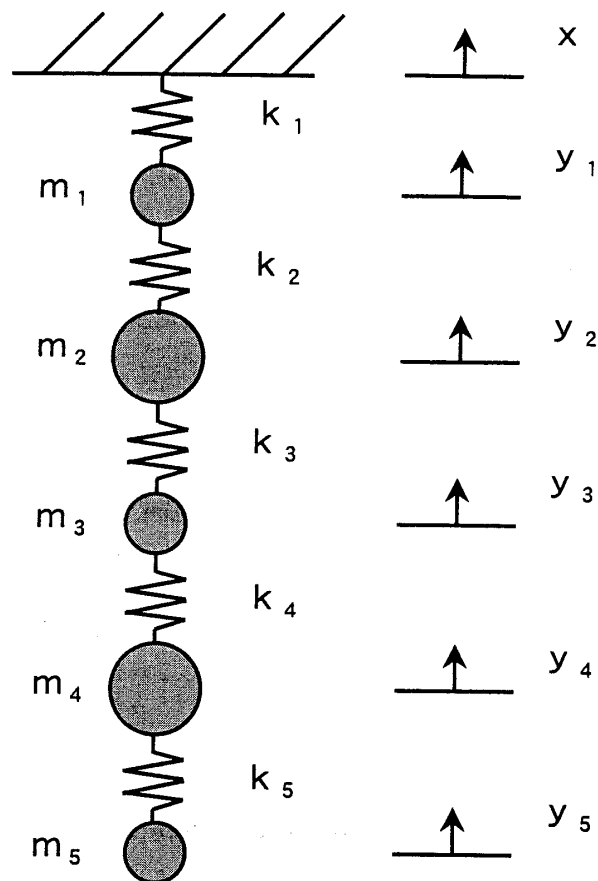


Fig. A-1 5 mass riser model

本式左辺第1項が慣性項、第2項が流体抵抗による減衰項、第3項がライザーの伸び（縮み）による復原項である。本式には、ライザーの運動にもとづく速度の2乗に比例する非線形な抵抗成分が含まれているため、運動方程式を解くためには数値的手法を必要とする。なお、第2項の減衰項を無視したときには、問題は線形化され(4)式の定常状態における解析解が次式のように得られる。

$$\overline{y_1 - x} = \bar{x} \left\{ \frac{k_1 c}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2) c - k_2^2 b} - 1 \right\} \quad (5)$$

ただし

$$\begin{aligned}
 a &= (k_4 + k_5 - m_4 \omega^2)(k_5 - m_5 \omega^2) - k_5^2 \\
 b &= (k_3 + k_4 - m_3 \omega^2)a - k_4^2(k_5 - m_5 \omega^2) \\
 c &= (k_2 + k_3 - m_2 \omega^2)b - k_3^2 a
 \end{aligned}$$

相対変位の振幅を $\overline{y_1 - x}$ と表すとき、変動張力振幅 T_F は

$$T_F = k_1 (\overline{y_1 - x}) \quad (6)$$

と表される。

また、運動方程式を時刻歴ベースに数値的に解くことにより、非線形減衰項を考慮に入れてライザー上端部の変動張力を計算することができる。

A-2 縦方向流体抵抗係数の推定

ライザーが上下に運動するとき、次のような流体抵抗成分がライザーに作用すると考えられる。

- (1) ライザーと外部/内部流体との摩擦による抵抗
- (2) ライザー下端集中質量の抵抗
- (3) 継ぎ手やその他付加物に作用する抵抗

上記のうち、(1)のライザーによる摩擦抵抗係数について考える。摩擦抵抗係数 C_f は、次式で表されるプラントル・シュリヒティングの式を用いて推定する。

$$C_f = \frac{0.455}{\log_{10}(Re)^{2.58}}, \quad Re = \frac{x_0 u}{\nu} \quad (7)$$

x_0 は代表長さ、 u は流速、 ν は流体の動粘性係数である。

u, ν のオーダーは、それぞれ

$$u = O(1), \quad \nu = O(10^{-6})$$

と考えられる。 x_0 については、代表長さをライザー全長とすれば $O(10^3)$ であり、ライザーの直径を代表長さとして $O(1)$ である。それぞれについて摩擦抵抗係数を考えると Table A-1 のようになる。 C_f として、0.0015 から 0.0045 程度の値を考えればよいことが分かる。

なお、Besançon らは別途次のような近似式を提案しており¹²⁾、オーダー的に本検討結果と一致している。

$$C_f = \max\left(\sqrt{\frac{2}{Re_{wait}}}; 0.005\right), \quad Re_{wait} = \frac{A^2 \omega}{\nu} \quad (8)$$

A は加振振幅である。

A-3 不規則加振時刻歴解析法

本解析手法は、数値的に不規則波を発生させ、不規則的な加振のもとでライザー挙動時刻歴解析を行うというものである。その手順を簡単に以下に示す。

- (1) 波スペクトルを分解して、不規則波の各周波数成分の波振幅を求める。位相差については、別途ランダムに与える。
- (2) (1)を作用させて船体の不規則動揺の時刻歴を作成する。
- (3) (2)をライザー上端に作用させてライザー変動張力等の不規則応答の時刻歴を求める。
- (4) 長時間の時刻歴計算結果からライザー変動張力の

Table A-1 Comparison of frictional resistance coefficients of the riser

x_0	Re	C_f
$O(10^3)$	$O(10^9)$	0.0015
$O(1)$	$O(10^6)$	0.0045

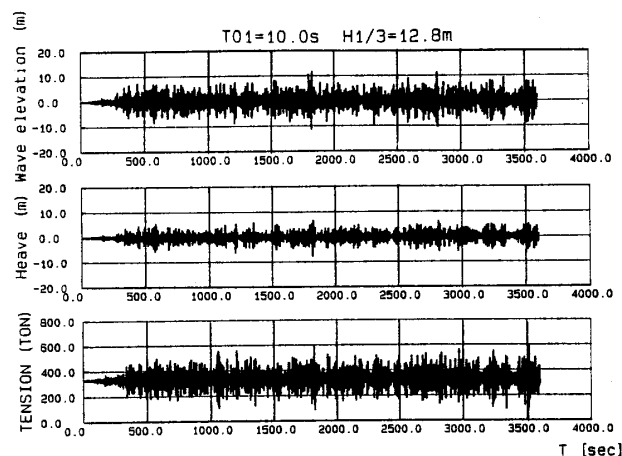


Fig. A-2 Results of time domain irregular analysis (upper: wave height, middle: ship's heave, lower: tension variation of riser top)

最大値を推定する。

本手法は、実海域での現象を文字どおりシミュレートしたことになるという分かり易い点がある反面、演算時間が膨大で、取り扱いが煩雑であるという欠点を持つ。

参考のため、Fig. A-2 に、本文中でのライザー計算における波高、船体上下揺れ、ライザー上端部張力の不規則時刻歴計算結果を示す。有義波高 12.8 m、平均波周期 10.0 sec での結果である。