

## 弾性係留索により係留された大型石炭貯蔵浮体の運動応答解析 -弾性係留索とカテナリー係留による運動応答の比較-

### Motion Response Analysis of Large Coal Storage Floats Moored by Elastic Mooring Lines -Comparison of Motor Response by Elastic Mooring and Catenary Mooring-

○鈴木湧大<sup>1</sup>, 立原直樹<sup>1</sup>, 盛一佑太<sup>1</sup>, 関口諒<sup>2</sup>, 鹿島瞳<sup>2</sup>, 恵藤浩朗<sup>3</sup>

\*Yudai Suzuki<sup>1</sup>, Naoki Tatihara<sup>1</sup>, Yuta Moriichi<sup>1</sup>, Ryo Sekiguchi<sup>2</sup>, Hitomi Kashima<sup>2</sup>, Hiroaki Eto<sup>3</sup>

Abstract: In past studies, it was found that elastic mooring ropes can be fully adapted as mooring systems for large floating bodies by conducting analyzes that incorporate elastic mooring lines into the mooring systems for large coal storage floats and understanding their motion response characteristics. It became clear. However, since the set sea conditions and mooring methods were limited, in this study, we performed an analysis in which each parameter was changed, and compared the results with the results of the motor response by catenary mooring, which was useful for elastic mooring lines. Sexual evaluation was performed.

#### 1. はじめに

弾性係留索は主に栈橋や養殖施設などの小型構造物の係留に多く使用されており、弾性体を複数束ねることにより係留索の規格を変更できる。既存研究より弾性係留索は大型浮体の係留システムとして十分適用可能であることが明らかになったが設定した海象条件や係留方法は限定的であった。そこで本研究では各パラメータを変化させた解析を実施し、その結果をカテナリー係留による運動応答の結果と比較することで、弾性係留索の有用性の把握に努めた。

#### 2. 計算手法

本研究では長周期変動波漂流力や係留の非線形性を考慮するため、固有周期に応じた共振現象も含めたC.I法を用いる<sup>1-3</sup>。C.I法を用いた時間領域の運動方程式を(1)式に示す。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^6 \left\{ m_{ij} + A_{m_{ij}}(\infty) \right\} \ddot{\xi}_j(t) \\ & + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{\xi}_j(\tau) d\tau + B_{W_{ij}} \dot{\xi}_j(t) + N_{V_{ij}} \xi_j(t) \left[ \dot{\xi}_j(t) \right] \\ & + C_{ij} \xi_j(t) + G_i \{ \xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_6(t) \} \\ & = F_i^{(1)}(t) + F_i^{(2)}(t) + F_{W_i}(t) + F_{C_i}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

(i = 1~6)

但し、 $m_{ij}$ ：浮体の広義の質量、 $A_{m_{ij}}$ ：周波数無限大での付加質量、 $K_{ij}(t)$ ：メモリー影響関数、 $B_{W_{ij}}$ ：波漂流減衰係数、 $N_{V_{ij}}$ ：粘性減衰力係数、 $C_{ij}$ ：静的復元力係数、 $G_i$ ：係留力、 $\xi_j$ ：浮体の加速度振幅、 $\dot{\xi}_j$ ：浮体の速度振幅、 $\xi_j$ ：浮体の運動振幅

#### 3. 計算モデルと条件

解析を実施する際の計算条件は、石炭エネルギーセンターによる調査資料<sup>4</sup>を参考に決定された。またLFTSを設置海域に配置する上で、その海域の海象条件に応じた配置が可能であることと、本研究では弾性係留索とカテナリー係留を比較し、大型浮体の係留シス

テムに弾性係留索を適用した際の有用性を把握することを主たる目的としていることから波、潮流、風荷重の入射角をヘッドシーの条件(0deg)として解析を進めた。Table1にLFTSの設置海域の年最大の自然環境条件とチェーン部分条件を、Figure1にLFTSの規模と係留条件を示す。弾性係留索はFigure2に示す特性<sup>5</sup>のラバーロープ(φ36mm)を205本束ねたもので構成され、初期状態は伸び率0.55と設定した。

Table 1. Calculation conditions

Natural environmental conditions(Maximum value)	
Significant wave height	3.02m
Significant wave period	8.50s
Wind speed	8.37m/s
Tidal current velocity	0.70m/s
Chain partial conditions	
Breaking Load	6082.6kN
Nominal diameter	φ92mm
Weight per unit length	1.82kN/m

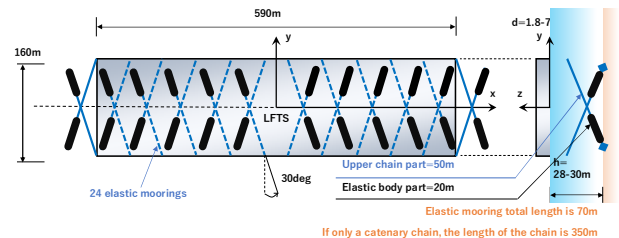


Figure 1. LFTS scale and mooring system layout

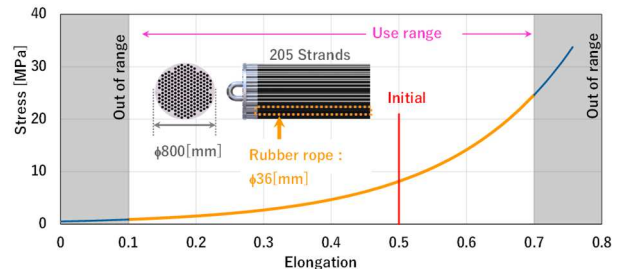


Figure 2. Scope of rubber rope used for elastic mooring ropes

## 4. 応答解析結果

### 4.1 一次波強制力と二次波強制力による運動応答

波浪外力による運動応答への影響を把握するため、平均水深で石炭が空荷の  $h=30\text{m}$ ,  $d=1.8\text{m}$ , 有義波周期  $8.5\text{s}$  での解析を行った。一次波強制力と二次波強制力の時系列と弾性係留索とカタナリー係留の時系列応答を Figure 3 に示す。一次波強制力と二次波強制力を比較すると、二次波強制力は長周期成分が確認され、荷重は一次波強制力の約  $1/3$  と小さい値で得られた。LFTS の運動応答はカタナリー係留と弾性係留索はチェーンの規格を  $\phi 92\text{mm}$  に合わせて解析を実施した。弾性係留索の動揺は約  $3\text{m}$  に抑えられたがカタナリー係留では約  $7\text{m}$  もの動揺を示した。

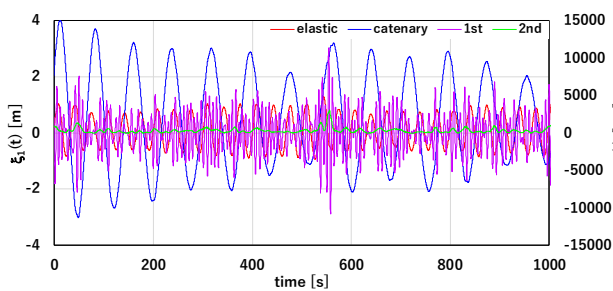


Figure 3. Time series of 1st order wave exciting force, 2nd order wave exciting force, and motion response

### 4.2 有義波周期別における弾性係留索とカタナリー係留の運動応答の比較

有義波周期の影響による運動応答の変化を把握するため有義波周期を変化させた解析を行い弾性係留索とカタナリーの運動応答を比較した。係留索が最も緊張状態となる  $h=32\text{m}$ ,  $d=1.8\text{m}$ , 平均水深で石炭が空荷の今回の計算条件の基本となる  $h=30\text{m}$ ,  $d=1.8\text{m}$ , 最も係留索が緩む  $h=28\text{m}$ ,  $d=7.0\text{m}$  における有義波周期別の弾性係留索とカタナリー係留の最大応答の比較を Figure 4, その際の係留索取付点位置における係留索の最大張力を Figure 5 に示す。弾性係留索とカタナリー係留を比較すると、カタナリー係留は異なる有義波周期によって動揺に大きな差が表れたが、弾性係留索は有義波周期と比例するように大きくなっていく傾向が得られ、有義波周期による大きな動揺の変化は確認されず安定した動揺を示した。

弾性係留索はカタナリー係留よりも安定して運動応答が抑えられ、カタナリー係留では有義波周期が長くなると最大張力にばらつきが見られるが弾性係留索は周期がどのように変化しても安定した張力を保つことが可能であり、加えて破断荷重を下回っていることが確認できた。

これより、LFTS は石炭の積載条件による喫水の変化

や有義波周期を変化させたとしても安定して運動応答を抑えることが出来るので弾性係留索がカタナリー係留よりも優れていると言える。

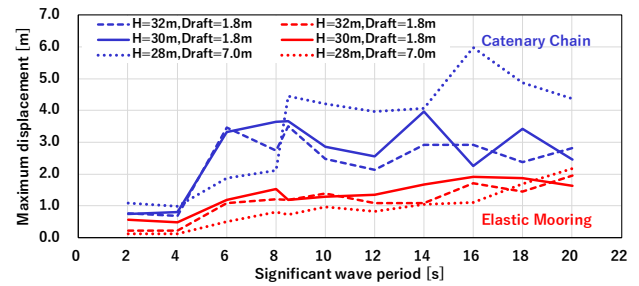


Figure 4. Maximum displacement of catenary chain and elastic mooring system for each significant wave period

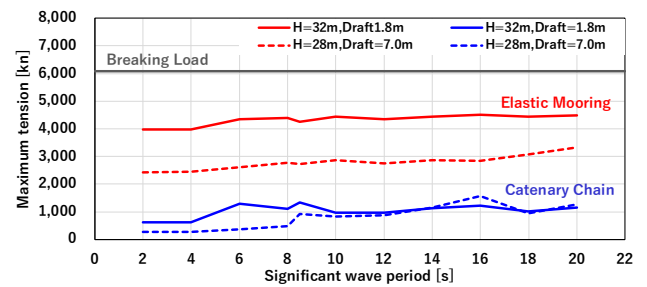


Figure 5. Maximum tension of catenary chain and elastic mooring system for each significant wave period

## 5. おわりに

本研究よりヘッドシーの計算条件での確認にとどまるが、弾性係留索はカタナリー係留で使用する係留索の長さが  $1/5$  程度であるにも関わらず、応答量を半減することが可能であり、またカタナリー係留索と比較して水深の変化に伴う応答量の変化を小さく抑えることが出来たことから、より安定的に大型浮体を係留可能であることが明らかとなった。今後、ヘッドシーの条件だけでなく、入射角を変化させた検討や、係留索の部材の諸元を変化させた系統計算を実施して、弾性係留索の有有用性について検討したいと考えている。

## 6. 参考文献

- 1) 三菱商事株式会社：インドネシアの石炭輸送における大型浮体構造物の活用に関する調査，三菱商事シンガポール店，研究・調査委託事業，2010。
- 2) Hiroaki Eto, et al. : Fundamental study on Elastic Behavior of Large-Scale Floating Coal Stockyard, Proceedings of OMAE 2016, OMAE-54958, 2016.6.
- 3) 惠藤浩朗, 鹿島瞳, 関口諒, 居駒知樹, 相田康洋, 増田光一：弾性係留索により係留された大型浮体の応答特性, 土木学会海洋開発 vol.76, No.2, 2020.5.
- 4) 財団法人 石炭エネルギーセンター：平成22年度インフラ・システム輸出促進調査等事業（インドネシア石炭資源の有効活用に資する洋上貯炭出荷及び輸送効率化に係る調査），2011.8.
- 5) Superflex mooring system : <http://supflex.com/>, 2020.3 参照