

海洋浮体構造物係留鎖の摩耗係数に関する実験的検討：第二報 摩耗特性の解明と統計処理による摩耗係数指標の提案

武内，崇晃
大阪大学大学院工学研究科

松田，知大
九州大学大学院工学府

宇都宮，智昭
九州大学大学院工学研究院

後藤，浩二
九州大学大学院工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/7396369>

出版情報：Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 40, pp.93-102, 2024. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

バージョン：

権利関係：Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International



海洋浮体構造物係留鎖の摩耗係数に関する実験的検討

—第二報 摩耗特性の解明と統計処理による摩耗係数指標の提案—

正会員 武 内 崇 晃* 松 田 知 大**
正会員 宇都宮 智 昭*** 正会員 後 藤 浩 二***

Experimental Study on Wear Coefficient of Mooring Chain for Floating Offshore Structures
-Second Report: Elucidation of Wear Characteristics and Proposal of Wear Coefficient through Statistical Analysis-

by Takaaki Takeuchi, *Member* Tomohiro Matsuda
Tomoaki Utsunomiya, *Member* Koji Gotoh, *Member*

Summary

In pursuit of a carbon-neutral society by the year 2050, floating offshore wind turbines (FOWTs) garner heightened expectations. Mooring chains are commonly employed for the station-keeping of FOWTs; however, long-term use can cause failure attributable to wear and corrosion. Among these, interlink wear caused by floating body motion can be estimated by dynamic analysis, but it is important to accurately determine the wear characteristics in order to properly estimate the wear allowance. In this paper, an additional 11 wear tests were conducted following the previously reported by using the heat-treated surfaces under fully submerged conditions to investigate the effect on the wear amount by the characteristics of the wear test machine such as sliding range and sliding direction. Since these were found to have little effect on the wear amount, a statistical reassessment of the wear coefficient was performed including the previously reported results. As a result, it was found that the obtained wear coefficients conform to a log-normal distribution, and a formula for wear estimation was proposed considering the observed variations.

1. 結 言

我が国では 2050 年カーボンニュートラル宣言を受けて、再生可能エネルギーの導入拡大を進めている。IEA¹⁾は、電源構成に占める再生可能エネルギーの比率を年々上方修正しており、2040 年には 88%にまで達するとしている。その中でも、風力発電は CO₂ 削減効果が最も高く²⁾、島国である我が国において高い導入ポテンシャルを有する洋上風力発電³⁾では、2030 年までの導入目標を 10 GW としている。その達成に向け、再エネ海域利用法による案件形成が加速しており、領海や内水だけでなく EEZ においても洋上風力発電のニーズが高まっており、周辺海域の特徴を鑑みれば浮体式が主体となることが考えられる。

浮体式洋上風力発電（FOWT）の実用化には、建造や設置、メンテナンス等に関わるコスト削減が必要不可欠であるが、DNV⁴⁾はその中でも係留システムが最大の障害であると報告している。これは定期検査の要求⁵⁾や、Oil&Gas

業界において多数報告される破断事例の多さ^{例えば 5)}、保守点検の困難さやコスト高に起因している。破断要因の中でも、FOWT にて多く適用される三点カテナリー方式では振り回り運動が小さく、係留鎖の面外繰り返し曲げによる低サイクル疲労は問題にならない。従って、FOWT における係留鎖の損傷は、摩耗や腐食、もしくはその相互作用による形状変化の影響を受けることが考えられる。Mendoza et al.⁶⁾や Lone et al.⁷⁾は、一定期間使用後に回収した係留鎖にて疲労試験を行っており、破断位置の約 8 割が crown（曲がり部頂部）に集中していることを報告している。その原因として孔食を起因とした亀裂発生だけでなく、摩耗による係留鎖径の減少についても言及しており、経年劣化を正確に把握することが重要となっている。

自航機能を有さない FOWT においても、船舶と同様に係留鎖全長にわたる定期検査⁴⁾が求められており、実用化に向けて合理的な保守点検計画の策定が求められている。その実現には、係留鎖の経年摩耗を定量的に推定する必要がある。著者ら⁸⁾は、係留鎖間の有限要素（FE）解析と浮体-係留系の全体解析を組み合わせることで定量的な摩耗量推定手法を提案したが、推定式は Archard⁹⁾の式(1)に基づいており、その推定精度は摩耗試験から得られる摩耗係数に依存する。しかし、ピン・オン・ディスク摩耗試験のような標準的な摩耗試験手法では、試験片形状に起因するびびり振動や不完全な面接触により安定した結果が得られない傾

* 大阪大学大学院工学研究科

** 九州大学大学院工学府（研究当時）

*** 九州大学大学院工学研究院

向がみられた¹⁰⁾.

$$W = \frac{K}{H} \sigma V_{rel} \quad (1)$$

ここで,

W : 摩耗率 (単位時間, 単位面積当たりの摩耗体積) [mm/s]
 K : 摩耗係数 [—]
 H : SI 単位系に換算したビッカース硬度 [N/mm²]
 σ : 摩耗面の作用応力 [N/mm²]
 V_{rel} : 摩耗面の相対滑り速度 [mm/s]

そこで, 既報¹¹⁾において, 完全没水環境下で熱処理後の係留鎖表面間の摺動が可能な摩耗試験機を開発し, 変動係数が 1.3 程度であったピン・オン・ディスク摩耗試験と比べて, 0.2 程度のばらつきの小さな結果を得ている. 大久保ら¹²⁾も同様な摩耗試験を実施しばらつきの少ない結果を得ているものの, 試験数がごく少数であり, また, 実際の表面形状における摩耗特性の把握には至っていない.

一方, 著者らは続報¹³⁾にて, 3 次元計測を用いた FE 解析により摩耗面形状の影響について検討を行ったものの, 金属新生面に生じる腐食生成物や試験機の特性による摩耗量への影響に関する検討が不足していた. そこで, 本研究では上記の検討を行うとともに, 既報^{11, 13)}の試験結果を改めて整理し統計処理することで, ばらつきを考慮した摩耗係数の指標を示すことを目的とする. これにより推定誤差を加味した摩耗量推定が可能となる.

2. 摩耗試験および試験条件

2.1 摩耗試験機

既報¹¹⁾にて開発された摩耗試験機および試験片の外観をそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示す. この試験機はレバー比 1:10 の倍力機構にて上部 H 型鋼に重りを載せることで水槽内に設置した試験片に荷重し, Fig. 3 に示すスライダークランク機構にて摺動させる. このとき, 試験片は後述する取付向きに応じて Fig. 4 に示すように, 上部試験片は上部 H 型鋼にボルト結合し, 下部試験片は水槽のキー溝にはめ込み固定する. 人工海水中と蒸留水中では摩耗量に有意な差が生じないこと¹⁰⁾から, 既報^{11, 13)}と同様に蒸留水を用いて試験を実施した. また, 試験片は ABS¹⁴⁾で規定される Grade R3, Grade R3S の公称直径 60 mm の係留鎖および係留鎖加工前の丸棒から切り出し, 上部試験片と下部試験片の 2 種類を作成している. 摩耗試験の詳細や摩耗係数の算出方法については既報¹¹⁾を参照されたい.

摩耗量の計測には, 汎用電子天秤 (A&D MC-6100, 秤量 6100g, 最小表示 0.001g) を用い, 試験前後の重量を計測しその重量差を摩耗量とした. また, 試験後に試験片を洗い流し, 十分に乾燥させた状態で計測を行った.

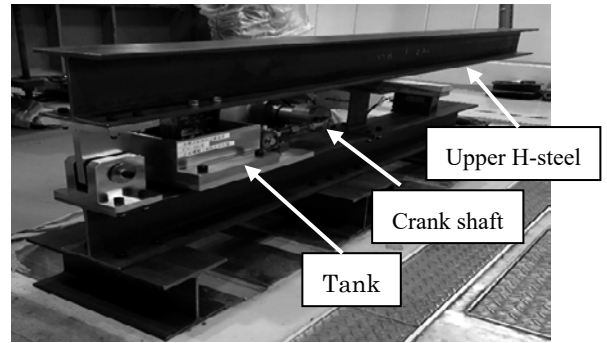


Fig. 1 Overview of wear test machine.

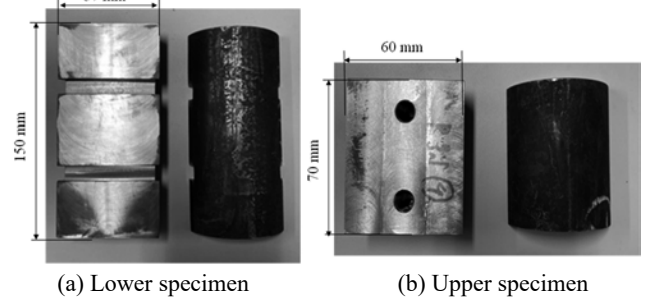


Fig. 2 Overview of specimens.

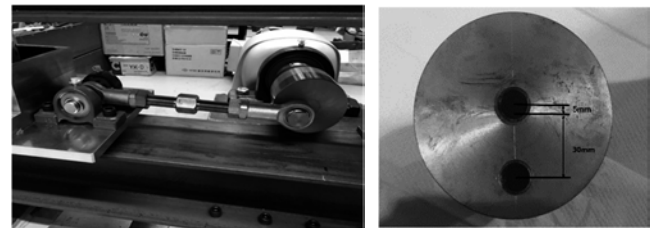


Fig. 3 Slider crank mechanism and modified crankshaft.

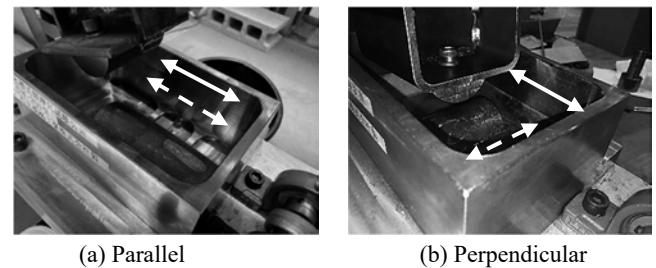


Fig. 4 Orientation of lower specimen (dashed arrow) relative to sliding direction (solid arrow).

2.2 試験条件

既報^{11, 13)}も含めた試験条件を Table 1 に示す. 押付荷重 4.9 kN, モーター回転速度 7.5 rpm, 摺動範囲 ±20 mm, 総摺動距離 1800 m, 水槽設置の下部試験片と摺動方向が平行 (Fig. 4 (a)) となるものを基本試験条件とし, 摩耗特性の把握を行った. 以下にこれまで実施した摩耗試験の概要を示し, 本研究での検討課題を整理する.

Test No. 1~5 では, 押付荷重 4.9 kN と 9.8 kN の 2 通りの荷重下で試験を行い, 摩耗量が見掛けの接触面積によらず荷重に比例すること¹⁵⁾を確認した. このとき, 摩耗初期の

Test No. 15~20 では 1 計測間隔を 300 m とし、計測間隔ごとに 3 次元計測した表面形状を用いて FE 解析を行うこと

で、摺動面形状の影響を検討した。しかし、半円状の理想形状モデルよりも精度よく摩耗量を推定できることを確認したものの、摩耗量の変化を正確に捉えることはできていない。Test No. 21~24 では、モーター回転速度を 11.25 rpm に加速し、金属新生面の曝露時間の影響について検討を行った。腐食生成物は金属新生面にて生じやすく、一般に吸着力が弱く離脱しやすい¹⁸⁾ものの、その生成には雰囲気気体分子への十分な曝露時間を要する。曝露時間の減少した Test No. 21~24 では、低速試験と比べて摩耗量が小さくなる傾向を確認した。

Test No.	Grade	Applied load [kN]	Rotational speed [rpm]	Sliding range [mm]	Total sliding distance [m]	Orientation of lower specimen relative to sliding direction	Ref.		
1	R3	4.9	7.5	±20	100×3 200×3 300×3	Parallel	[11]		
2									
3									
4									
5									
6	R3S	4.9			100×18				
7					300×6				
8									
9					600×3				
10									
11									
12					100×5 200×5 300×5				
13									
14									
15	R3	4.9	7.5	±20	300×6	Parallel	[12]		
16									
17									
18	R3S								
19									
20									
21	R3	11.25							
22									
23	R3S								
24									
25	R3S			4.9	7.5	±30	300×6	Parallel	—
26									
27									
28		±5	Perpendicular						
29									
30		±20							
31									
32									
33		R3	4.9			7.5	±20	300×6	
34									
35									

これまでの摩耗試験において、上部試験片と下部試験片の間で摩耗量に差が生じており、本研究ではこの原因について検討を行った。上下試験片間の差異として試験片位置により摺動条件が異なることが考えられたため、摺動面積と摺動試験片の向きの 2 つを変化させることでその影響について確認する。まず、Test No. 25~29 において、摺動範囲を変化させることで摺動面積の影響を検証する。試験片の摺動範囲はクランクシャフトの取付位置により決まるため、Fig. 3 に示すように回転中心から 5 mm および 30 mm に変更できるよう改造を行った。

次に、摺動方向の影響について検討を行った。これまで、摺動方向に対して平行 (Fig. 4 (a)) な下部試験片において接触面が長手方向に周期的に変化することで金属新生面が蒸留水に暴露されていたのに対し、上部試験片の摩耗面は常に接触状態にあり、上下位置で曝露状態が異なる。また、シビアマイルド摩耗遷移と同様に摩耗粉の堆積の影響^{16, 17)}が考えられることから、上下試験片間の摩耗量の差が金属新生面の曝露と摩耗粉の堆積どちらに起因するのか明らかにする必要がある。そこで、Test No. 30~35 では下部試験片が摺動方向に垂直 (Fig. 4 (b)) に設置できるように改造し、摺動方向に平行となる上部試験片の金属新生面が暴露され、摩耗粉が堆積しない試験も行った。

3. 試験結果

本研究にて実施した Test No. 25 ~ 35 について試験結果を報告する。ここで、摺動面が試験片長手方向に生成され金属新生面が蒸留水に曝露されるものを Lng 試験片 (Longitudinal specimen)、試験片に対して垂直に摺動し金属新生面が常にもう一方の摺動面と接しているものを Perp 試験片 (Perpendicular specimen) と呼ぶ。

3.1 摺動面積の影響 (Test No. 25 ~ 29)

摺動面積の影響について、摺動範囲を変化させた Test No. 25 ~ 29 と、摺動範囲以外の試験条件が同じ Test No. 8, 9, 18 ~ 20 との比較を行った。Fig. 5 に摩耗量進行曲線を示す。Lng 試験片、Perp 試験片ともに総摩耗量に有意な差は認められない。しかし、摺動範囲 ± 30 mm (Test No. 25 ~ 27) の方が、摺動範囲 ± 5 mm (Test No. 28, 29) の場合に比べて、摺動距離 300 m 以降の摩耗量の増加がやや緩やかになっている傾向が認められる。摺動範囲 ± 20 mm においても、Test No. 9 のみ傾向が異なるものの、摺動距離 600 m 以降において同様の傾向が確認できる。

金属新生面の曝露時間の減少により摩耗量の低減を確認した Test No. 21~24 とは異なり、この試験ではモーター回転数は一定であるため曝露時間も試験間で一定である。摺動速度の最大値は摺動範囲 ± 30 , ± 20 , ± 5 mm それぞれにお

いて 23.7, 15.7, 3.93 mm/s となっており、摺動範囲による摩耗率の変化は摩擦速度依存性を示唆している可能性がある。しかし、本試験条件においては摩耗量進行曲線の定性的な違いは認められるものの、ばらつきの範囲とも言える。本研究では、波周期を対象として主に 0.125 Hz にて摩耗試験を行ったが、浮体固有周期においても係留鎖運動が生じることから 0.01 Hz 程度の低周波数領域においても、摩耗特性の把握を今後行う必要がある。

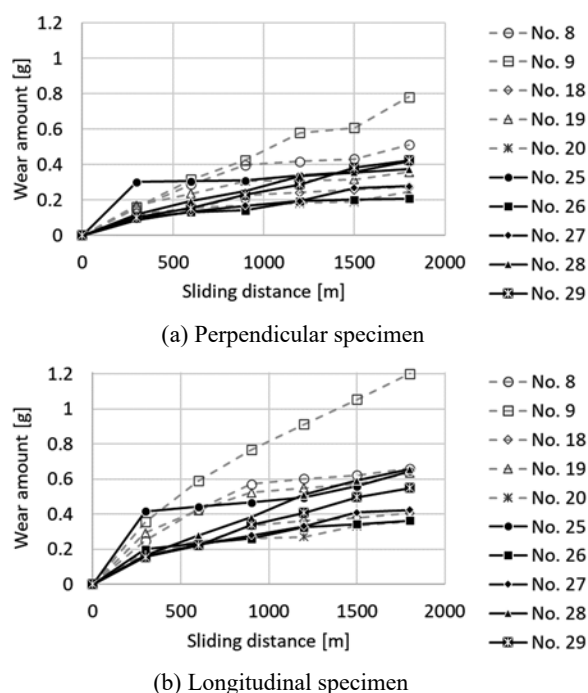


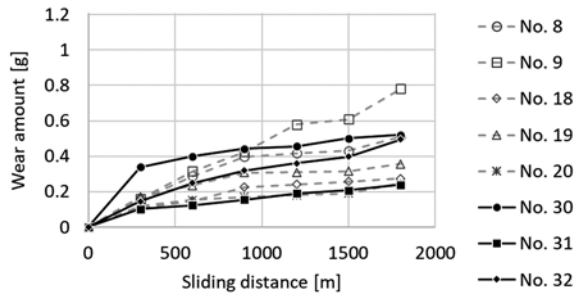
Fig. 5 Wear progression curve varying the sliding range for Grade R3S.

3.2 摺動方向の影響 (Test No. 30 ~ 35)

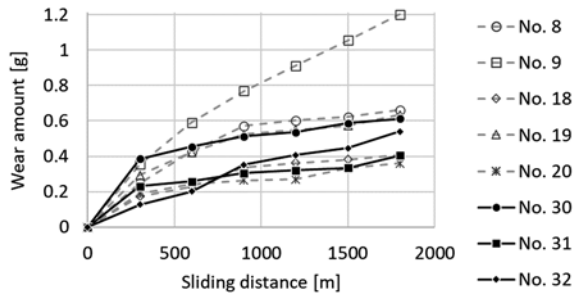
Fig. 5 に示す通り、従来の本試験機では下部の Lng 試験片のほうが上部の Perp 試験片よりも摩耗量が大きくなることが分かっている。その原因として主に金属新生面の曝露の有無が考えられるが、上下位置による摩耗粉の堆積や排出に差を生じるといった試験機の構造に起因する可能性が考えられたため、上下試験片の向きを入れ替えた試験を実施した。

上下試験片の入れ替えにより摺動方向を変化させた Test No. 30 ~ 35 について、下部試験片の摺動方向以外の条件が同じ試験との比較を行う。Grade R3S については Test No. 8, 9, 18 ~ 20 と、Grade R3 については Test No. 15 ~ 17 と比較を行った。その摩耗進行曲線を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。いずれの Grade においても、従来の結果と同様に Lng 試験片の方が摩耗量が大きく、上下位置入れ替え前後において Lng・Perp 試験片それぞれで摩耗傾向や総摩耗量に大きな差はないことが確認できる。これにより、上下試験片の摩耗量の差は試験機自体の特性によるものではなく、摺動面

の曝露に起因するものであることが確認できた。

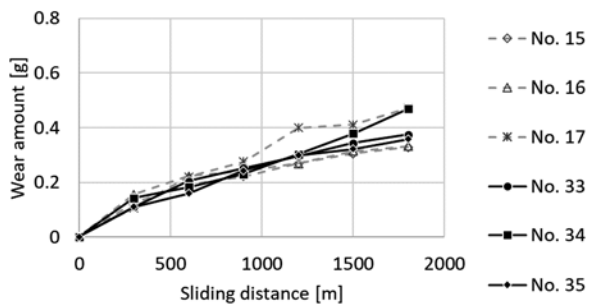


(a) Perpendicular specimen

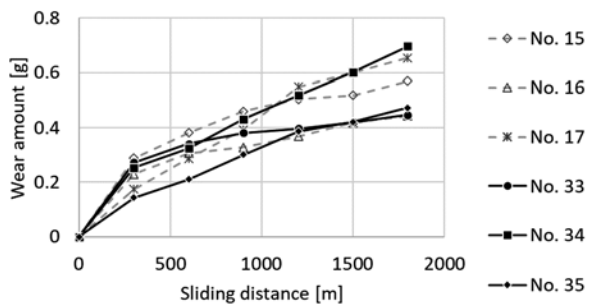


(b) Longitudinal specimen

Fig. 6 Wear progression curve varying the sliding direction of lower specimen for Grade R3S.



(a) Perpendicular specimen



(b) Longitudinal specimen

Fig. 7 Wear progression curve varying the sliding direction of lower specimen for Grade R3.

本試験において摺動面の曝露状況に試験片間で差が生じると同様に、実機係留鎖においても、張力変動により面内変位となるリンクは常に摺動面が接触し、面外変位となるリンクは摺動面が海水に曝露される。また、現状の係留

鎖の減厚計測方法はノギスや外観形状測定であるため、摩耗量は隣接する 2 リンクの合計値として計測される。次節の摩耗係数の算出では、Lng 試験片と Perp 試験片のそれぞれで摩耗係数を算出し、その平均値を代表値とした。

3.3 摩耗係数の算出

摩耗試験 Test No. 1~35 の結果から摩耗係数を算出する。比摩耗量の式(2)および Holm¹⁹⁾の摩耗式(3)より導出される摩耗係数の算出式(4)を用いる。

$$W_s = \frac{W_1 - W_2}{PL\rho} \quad (2)$$

$$V = \frac{KLP}{H} \quad (3)$$

$$K = HW_s \quad (4)$$

ここで、

V : 摩耗体積 [mm³]

W_s : 比摩耗量 [mm²/N]

W_1 : 試験前の重量 [g]

W_2 : 試験後の重量 [g]

P : 荷重 [N]

L : 摺動距離 [mm]

ρ : 密度 [g/mm³]

K : 摩耗係数 [—]

H : SI 単位系に換算したビッカース硬度 [N/mm²]

各試験片の摩耗量進行曲線から、最小二乗法により近似直線を作成し、その傾き $\Delta W/L$ から式(2)より比摩耗量を求め、上部試験片、下部試験片それぞれの摩耗係数を式(4)から算出し、それらを平均したものを各試験における摩耗係数として算出する。既報^{11, 13)}では原点を通る近似直線から総摺動距離全体の $\Delta W/L$ を算出していたが、摺動距離 0 m ~ 300 m の初期摩耗は 300 m 以降に比べ摩耗量が大きく、摩耗特性が異なる。そこで、本研究では原点を通らない近似直線を用いて、0 m ~ 1800 m および、0 m ~ 300 m と 300 m ~ 1800 m の区間に分けた摩耗係数をそれぞれ算出した。また、ビッカース硬さは材料物性値であるため、別途ビッカース硬さ試験を実施している。試験片の密度は、先行研究¹⁰⁾に倣い 7.85×10^{-3} g/mm³ とした。

Table 2 に摩耗係数の算出結果および、Grade ごとの標本平均、標本標準偏差、変動係数、標準誤差を示す。標本平均を見ると、いずれの区間においても Grade R3 に比べて Grade R3S の方がやや大きな値となっているがその差は小さく、その他統計値においても同程度となっているため、両者の摩耗特性はおおよそ同じものと考えられる。そこで、次節にて、Grade R3 および R3S を合わせた結果をもとに、ばらつきを考慮した摩耗係数の提案を行う。

Table 2 Wear coefficient calculated for each section.

Grade	Test No.	Applied load [kN]	Hardness [N/mm ²]	Wear coefficient [×10 ⁻⁴]		
				0 m ~ 1800 m	0 m ~ 300 m	300 m ~ 1800 m
R3	1	4.9	2590	0.436	0.402	0.442
	2			0.224	0.293	0.206
	3			0.292	0.412	0.269
	4	9.8		0.312	0.525	0.264
	5			0.318	0.562	0.279
	15	4.9	2510	0.145	0.448	0.102
	16			0.121	0.420	0.082
	17			0.206	0.307	0.187
	21			0.069	0.213	0.048
	22			0.076	0.210	0.057
	33			0.131	0.416	0.091
	34			0.194	0.432	0.169
	35			0.147	0.275	0.129
	Average				0.206	0.378
Standard deviation				0.104	0.106	0.109
Coefficient of variation				0.505	0.281	0.607
Standard error				0.029	0.029	0.030
R3S	6	4.9	3000	0.257	0.474	0.228
	7			0.317	0.490	0.301
	8			0.238	0.524	0.183
	9			0.410	0.668	0.368
	10			0.438	0.532	0.421
	11			0.085	0.209	0.060
	12			0.286	0.455	0.278
	13			0.335	0.357	0.332
	14			0.372	0.494	0.358
	18			2940	0.135	0.362
	19		0.183		0.591	0.122
	20		0.105		0.392	0.069
	23		0.105		0.303	0.080
	24		0.107		0.281	0.076
	25		0.167		0.916	0.083
	26		0.107		0.382	0.073
	27		0.142		0.319	0.120
	28		0.218		0.363	0.196
	29		0.204		0.329	0.190
	30		0.194		0.923	0.101
	31		0.113		0.423	0.076
	32		0.208	0.348	0.185	
Average				0.215	0.461	0.182
Standard deviation				0.103	0.179	0.111
Coefficient of variation				0.481	0.389	0.612
Standard error				0.022	0.038	0.024

Table 3 Population parameters and fitting results for each distribution with the wear coefficient as the random variable.

Sliding distance [m]	log-normal distribution				Rayleigh distribution			Weibull distribution			
	log-mean	log-standard deviation	AIC	p-value	scale	AIC	p-value	shape	scale	AIC	p-value
0-1800 m	-10.89	0.5049	-706.7	0.9573	1.664E-05	-706.3	0.9120	2.194	2.398E-05	-704.8	0.7854
0-300 m	-10.12	0.3458	-679.1	0.9895	3.247E-05	-666.8	0.0657	2.732	4.827E-05	-670.6	0.5658
300-1800 m	-11.11	0.6310	-706.8	0.6311	1.498E-05	-705.3	0.1472	1.745	2.043E-05	-704.5	0.4746

Table 4 Population parameters and fitting results for each distribution with the inverse of the wear coefficient as the random variable.

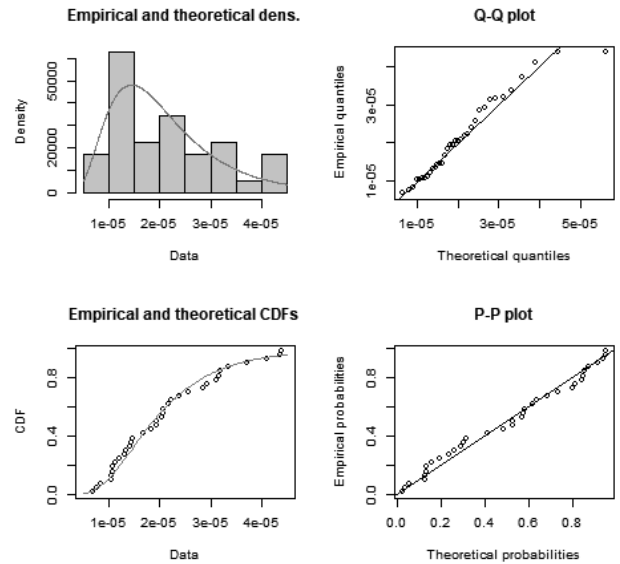
Sliding distance [m]	log-normal distribution				Rayleigh distribution			Weibull distribution			
	log-mean	log-standard deviation	AIC	p-value	scale	AIC	p-value	shape	scale	AIC	p-value
0-1800 m	10.89	0.5049	817.6	0.9573	35479	836.1	3.442.E-02	2.097	68964	821.5	0.6574
0-300 m	10.12	0.3458	737.1	0.9895	43024	802.1	3.239.E-13	3.063	29315	740.2	0.7997
300-1800 m	11.11	0.6310	849.0	0.6311	45283	878.1	3.098.E-03	1.766	91695	850.8	0.3667

3.4 摩耗係数の統計解析

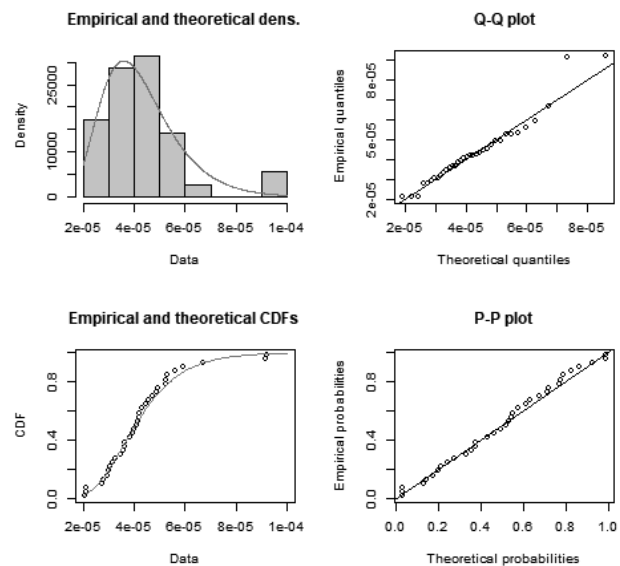
信頼性工学で故障時間の解析において用いられる、対数正規分布、Rayleigh 分布、Weibull 分布の 3 つの確率分布について比較を行った。摩耗係数の増加が故障時間を早めることは容易に推測でき、本研究では確率変数として摩耗係数だけでなくその逆数についても検討を行った。

GNU R²⁰⁾にてパラメトリック統計分析パッケージ *fitdistrplus*²¹⁾を使用し、摩耗係数とその逆数をそれぞれ単変量データとして上記確率分布への当てはめを行った。分布母数の最尤推定値と赤池情報量基準 (AIC)、Kolmogorov-Smirnov (K-S) 検定における p 値について、確率変数を摩耗係数としたものを Table 3、逆数を採用したものを Table 4 にそれぞれ示す。Table 3 から、確率変数を摩耗係数とした場合、いずれの確率分布においても p 値は有意水準 5% を下回るものではなく、AIC を比較すると 3.3 節で区分したいずれの区間においても、対数正規分布の当てはめが良いことが分かる。また、Table 4 から、確率変数を摩耗係数の逆数とした場合、Rayleigh 分布では p 値が有意水準 5% 以下で帰無仮説は棄却され、対数正規分布と Weibull 分布では棄却されず、AIC を比較すると Table 3 と同様に対数正規分布が最も高い適合度を示すことが分かる。限られた確率分布での比較であるが、本研究では摩耗係数およびその逆数が対数正規分布に従うものとした。このとき、両者の母数の絶対値は等しく、変数変換により確率変数を揃えた累積分布関数 (CDF) は同じものとなる。そこで、摩耗係数を確率変数とした対数正規分布について以下の検討を行った。

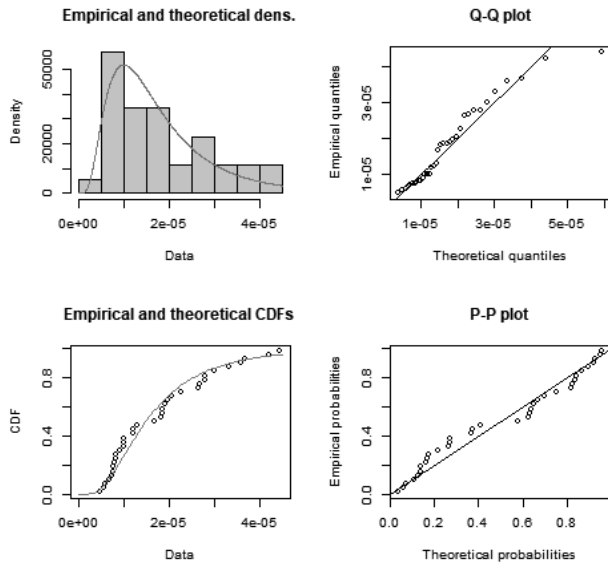
Table 3 に示す母数の対数正規分布について、確率密度や累積密度関数の比較、Q-Q plot、P-P plot を Fig. 8 に示す。300 ~ 1800 m の区間では多少変動は見られるものの、いずれの区間においても Q-Q plot と P-P plot は概ね直線 $y = x$ 上に位置しており、これは本試験から得られた確率変数の分布と対数正規分布の形状が類似していることを示している。



(a) 0~1800 m



(b) 0~300 m



(c) 300~1800 m

Fig. 8 Comparison of empirical and theoretical probability densities and CDFs, Q-Q plot, and P-P plot.

Table 5 Wear coefficient obtained by log-normal distribution with popular parameters estimated in Table 3 [$\times 10^{-4}$].

	Expected value	90% cumulative probability
0~1800 m	0.212	0.357
0~300 m	0.429	0.630
300~1800 m	0.182	0.335

各区間における摩耗係数の期待値と累積確率 90%値を Table 5 に示す。摺動距離に応じて Table 5 に示す期待値を用いて摩耗量推定を行い、摩耗量と摩耗係数の比例関係から必要に応じて安全率を乗じれば容易に誤差を見込んだ推定を行うことができる。以上の結果に基づいて、ばらつきを考慮した摩耗量推定式を提案する。

3.5 ばらつきを考慮した摩耗量推定式の提案

摩耗係数を累積確率 90%値、硬度を Table 2 における各 Grade 最小値を採用した場合、浮体-係留系の応答解析から係留鎖間における張力と相対変動角の時刻歴が得られれば、Holm の摩耗式(3)に基づく以下の式(5)を用いて係留鎖間の摩耗量を推定することができる。ここで、公称直径 81 mm の係留鎖について FE 解析を行った先行研究²²⁾から、曲がり部形状に起因する定数を 0.880 とし、すべての相対変動角が係留鎖間に滑りを生じるものとして摺動距離を算出している。これは係留鎖内径が $0.880d$ であることと同義であるが、Class NK²³⁾にて規定される最小許容寸法値 0.6d と比較するとやや大きな値となっており、これは耐力試験にて生じる圧痕形状に起因する。また、式(5)では転がりによる摩耗量低減を考慮していないため、変動角の大きなフェアリード位置やタッチダウンポイントでは過大な推定と

なることに注意されたい。転がりを考慮する場合、FE 解析から耐力試験後の形状にて転がり限界角を求め、転がり距離を摺動距離から減じる必要がある²²⁾。また、本研究は主に試験荷重 4.9 kN で摩耗試験を実施しており、摩耗係数の変化点は張力の大きさに応じて適切に見積もる必要がある。式(5)では、摩耗量が張力に単純比例するものとして、その変化点を示している。

$$V = \frac{K(L)}{H(\text{Grade})} T 0.880d \sum |\theta(t + \Delta t) - \theta(t)|$$

$$K(L) = \begin{cases} 0.630 \times 10^{-4} & (0 < \frac{T}{4,900} L < 300) \\ 0.335 \times 10^{-4} & (300 \leq \frac{T}{4,900} L < 1800) \end{cases} \quad (5)$$

$$H(\text{Grade}) = \begin{cases} 2510 & (\text{R3}) \\ 2940 & (\text{R3S}) \end{cases}$$

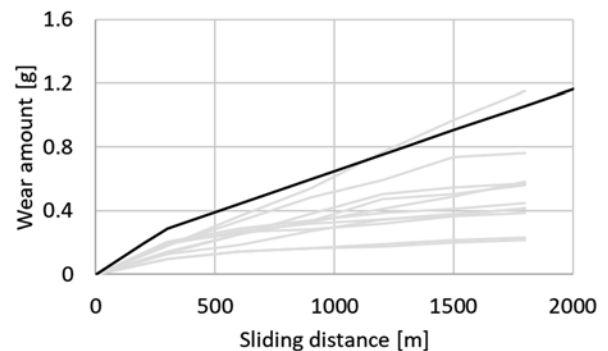
ここで、

T : 張力 [N]

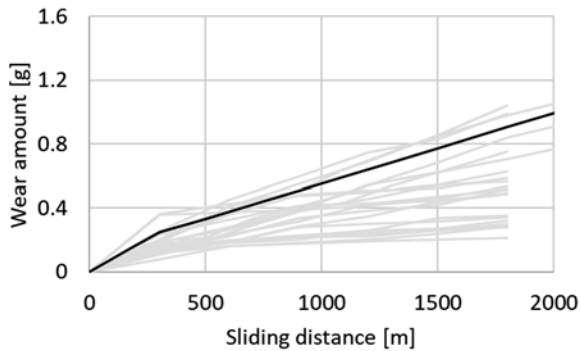
d : 係留鎖公称直径 [mm]

$\theta(t)$: ある時刻 t における相対変動角 [rad.]

参考までに、摩耗試験結果と式(5)から推定される摩耗量進行曲線の比較を、Grade R3 および R3S それぞれについて Fig. 9 に示す。摩耗試験結果を灰色実線で、推定結果を黒色実線で示している。ただし、Fig. 9 (a)の Grade R3 において荷重の異なる Test No. 4, 5 については同時比較ができないため図中に含めていない。また、式(5)で想定した係留鎖間の摺動とは異なり、本摩耗試験は直線摺動であるため式(5)における K 及び H を式(3)に適用し、その後質量に換算している。Fig. 9 から、提案した摩耗量推定式は摩耗試験結果を安全側によく表していることが分かる。



(a) Grade R3



(b) Grade R3S

Fig. 9 Comparison of measured and estimated wear progression curve.

5. 結言

海洋浮体構造物係留鎖における摩耗係数を同定することを目的として、完全没水環境下で熱処理後の係留鎖表面間を用いた摩耗試験を実施し、金属新生面に生じる腐食生成物や試験機特性による摩耗量への影響について検討を行った。また、既報の試験結果について改めて整理することで、以下の知見を得た。

- 摺動速度が遅いほど、摩耗進行に伴う摩耗率の減少が小さく、初期摩耗以降の摩耗率が大きい傾向がある。
- 試験片取付位置による摩耗量の差は、試験機特性によるものではなく、金属新生面の曝露と腐食生成物の摩耗し易さに起因する。
- 本試験で得られた摩耗係数が対数正規分布に従うことを明らかにし、ばらつきを考慮した摩耗量推定式の提案を行った。

本試験は従来の摩耗試験と比べて、実機に近い荷重条件となっているものの、周波数や荷重範囲は浮体式洋上風力発電設備をはじめとした海洋構造物における荷重条件を網羅できていない。今後、更なる高荷重や固有周期に近い低周波数での摩耗試験を実施し、広範囲にわたる摩耗特性の把握を行う必要がある。

謝 辞

本研究は、日本財団「海洋開発に係る日本ースコットランド連携技術開発助成－浮体式洋上風力発電の係留の寿命予測手法と係留材料の最適化」および JSPS 科研費 22K14428 の一部として実施したものである。また、本研究にて試験に供したチェーンリンクおよび丸棒を無償提供頂いた濱中製鎖工業株式会社に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) International Energy Agency: Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021.
- 2) International Energy Agency: Offshore wind outlook, 2019
- 3) Det Norske Veritas: Floating wind: Turning ambition into action, 2023.
- 4) ClassNK: Guideline for Floating Offshore Wind Turbines -Classification Survey-, 2021.
- 5) Fontaine, E., Kilner, A., Carra, C., Washington, D., Ma, K.T., Phadke, A., et al: Industry survey of past failures, pre-emptive replacements and reported degradations for mooring systems of floating production units, Offshore technology conference, OTC-25273, 2014.
- 6) Mendoza, J., Haagenen, J.P., and Köhler, J.: Analysis of fatigue test data of retrieved mooring chain links subject to pitting corrosion, Marine Structures, Vol. 81, 103119, 2022.
- 7) Lone, N.E., Maincon, P., Gabrielsen, Ø., Sauder, T., Larsen, K., and Leira, B.: Analysis of S-N data for new and corroded mooring chains at varying mean load levels using a hierarchical linear model, Marine Structures, Vol. 91, 103466, 2023.
- 8) Takeuchi, T., Utsunomiya, T., Gotoh, K., and Sato, I.: Development of interlink wear estimation method for mooring chain of floating structures: Validation and new approach using three-dimensional contact response, Marine Structures, Vol. 77, 102927, 2021.
- 9) Archard, J. F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces, Journal of Applied Physics, Vol. 24, pp. 981-988, 1953.
- 10) Gotoh, K., Utsunomiya, T., Nakagawa, M., and Yamane, K.: Experimental Study on Specific Wear of Mooring Chain for Floating Structure, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 28, pp. 145-154, 2018 (in Japanese).
- 11) Murakami, T., Takeuchi, T., and Utsunomiya, T., and Gotoh, K.: Experimental Study on Wear Coefficient of Mooring Chain for Floating Offshore Structures, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 34, pp. 63-71, 2021 (in Japanese).
- 12) Ookubo, H., Koizumi, A., Ootake, A., Kanno, M., Hayachi, N., Suzuki, M., Yagi, K.: Design of Mooring System of Fukushima Floating Offshore Wind Farm Demonstration Project ~Evaluation of Mooring Chian Durability and Mooring Design System~, Nippon Steel Engineering Co., Ltd. technical review, Vol. 13, 2022.
- 13) Murakami, T., Takeuchi, T., and Utsunomiya, T., and Gotoh, K.: Experimental and Analytical Study on Wear Coefficient of Mooring Chain by Using 3-D Measurement, Conference Proceedings the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 34, pp. 251-257, 2022 (in Japanese).
- 14) American Bureau of Shipping: Guide for Certification of

- Offshore Mooring Chain, 1999.
- 15) Archard, J. F., and Hirst, W.: The wear of metals under unlubricated conditions, Proc. Roy. Soc., Vol. 236, Issue 1206, pp. 397-410, 1956.
 - 16) Sata, T.: Mechanism of Transient Phenomena of Wear in Repeated Friction, Transactions of the JSME, Vol. 24, Issue 143, pp. 407-414, 1958 (in Japanese).
 - 17) Hiratsuka, K.: Role of Wear Particles in Severe-Mild Wear Transition, Transactions of the JSME Series C, Vol. 58, Issue 555, pp. 3362-3368, 1992 (in Japanese).
 - 18) Mizumoto, M., Usami, K.: Why wear occurs, Turbomachinery, Vol. 24, Issue 5, pp. 267-273, 1996.
水本宗男, 宇佐美健一: 摩耗はなぜ起こるのか, ターボ機械, 24 巻, 第 5 号, pp. 267-273, 1996.
 - 19) Holm, R.: Electrical Contacts 1st ed, Gerber Stockholm, 1946.
 - 20) R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. <https://www.R-project.org/>.
 - 21) Marie Laure Delignette-Muller, Christophe Dutang. fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions. Journal of Statistical Software, 64(4), 1-34, 2015.
<http://www.jstatsoft.org/v64/i04/>.
 - 22) Takeuchi, T., Kurokawa, K., Hironaka, M.: Study on the effect of proof load test on mooring chain wear for floating structures, Proceedings of the ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2023-104302, 2023.
 - 23) ClassNK: Rules for the survey and construction of steel ships Part L equipment, 2020.