九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

海洋浮体構造物係留鎖の摩耗係数に関する実験的検討

村上，貴昭
九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

武内，崇晃
大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻

宇都宮，智昭
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

後藤，浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

https://hdl.handle.net/2324/4763197

出版情報：Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 34, pp.63-71, 2021-12-01. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers
バージョン：
権利関係：© 2021 社団法人　日本船舶海洋工学会

KYUSHU UNIVERSITY

海洋浮体構造物係留鎖の摩耗係数に関する実験的検討

学生会員 村 上 貴 昭* 正会員 武 内 崇 晃**
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

by Takaaki Murakami, *Student Member* Takaaki Takeuchi, *Member*
Tomoaki Utsunomiya, *Member* Koji Gotoh, *Member*

Summary

Floating wind turbine facilities installed in deep sea areas play an essential role in carbon dioxide emissions reduction. One of the problems associated with the commercialization of these facilities is the maintenance cost for mooring chains. Therefore, it is necessary to establish a quantitative wear evaluation method for mooring chains. Wear coefficient measured by wear tests is one of the essential physical parameters to evaluate the wear performance of metals. The pin-on-disk wear test is generally performed for obtaining wear coefficient. However, wear coefficient measured by this method had significant variation in our past study. Additionally, it has difficulty to use the heat-treated surface of the mooring chain under high pressure in fully immersed wet condition. To reproduce the actual situation, new wear test machine was designed and wear tests were implemented to validate the accuracy. As a result, it is confirmed that the proposed wear test method is possible to obtain the wear coefficient with significantly small variation compared with the conventional pin-on-disk wear test.

1. 緒 言

浮体式洋上風力発電施設の実用化に向けて, 係留コストの削減が主要な課題となっている. 浮体運動が比較的少ない海域に設置される場合の係留鎖の損傷は, 腐食および摩耗が主要因となり, 浮体の設置海域に応じて, 腐食と摩耗のいずれが主な損傷要因となるかは異なる [1]. 温暖な海域では腐食が主要因となりやすくなる. また, 浮体式洋上風車と同様に長期の稼働が要求される FPSO 等の資源生産貯留設備における係留システムの損傷事故に関する報告資料 [2] を参照すれば, 潮流の強い海域に一点係留される設備では振れ回り運動と係留システムに作用する張力が大きくなることにより, 係留鎖が連結部でロックされるような現象が生じる. この結果, 鎖に面外繰り返し曲げ載荷が作用し, 低サイクル疲労により損傷すると指摘されている. 三点カテナリー方式である著者の一部ら [3] による浮体式洋上風力発電設備に適用される係留システムでは, 振れ回り運動は十分に小さいこともあり, チェーン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と言える. そのため, 浮体式洋上風力発電施設における係留システムの健全性を確保するためには, 係留鎖の摩耗量評価手法の確立が重要となる. 係留鎖の摩耗量評価手法を確立することで, 係留システムのメンテナンスフリー化により係留コストの削減が可能となる.

定量的な摩耗量評価手法の確立に向けて, 著者の一部ら [4] は商用有限要素解析コード MSC. Marc[5] を用いた係留鎖間の摩耗解析を行い, 係留鎖間摩耗試験結果との比較により, 実験結果を比較的精度よく推定可能であることを示している. 同コードでは摩耗量の推定に Archard[6] の式(1)が用いられている. 式(1)に含まれる摩耗係数 K およびビッカース硬度 H は材料物性値であるため, 別途試験により同定する必要がある. また, Archard ら [7] は無潤滑状態における摩耗試験を行い, 多くの金属の組み合わせにおいて摩耗率が見掛けの接触面積に依存しないことを確認しており, 摩耗の進行によって見掛けの接触面積が変化する係留鎖間摩耗においても適用可能と考えられる.

$$W = (K/H)\sigma V_{rel} \tag{1}$$

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]

* 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
** 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻
*** 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

原稿受理 令和 3 年 5 月 28 日

K: 摩耗係数 [−]
H: SI 単位系に換算したビッカース硬度 [N/mm^2]
σ: 摩耗面の作用応力 [N/mm^2]
V_{rel}: 摩耗面の相対滑り速度 [mm/s]

係留鎖摩耗に関する摩耗試験は数多く実施されている．Jayashinghe ら [8] は，係留鎖の摩耗に関する研究について取りまとめた報告の中で Rabinowicz[9] によるピン・オン・ディスク摩耗により得られた金属材料の摩耗係数に基づき，大気中および海水潤滑下での摩耗係数の範囲を示している．海水潤滑下での摩耗係数の値は3.7×10^{-4}～2.4×10^{-3}とオーダーが異なり，正確性に欠けると言える．一方，著者の一部ら [10] により，ピン・オン・ディスク摩耗試験が大気中と人工海水潤滑中で行われている．この結果を Table 1 に示すが，人工海水潤滑中の摩耗係数の方が明確に小さい値となっている．この理由として，肥田の報告 [11] を参照すれば，人工海水中の試験において摩耗面近傍で生じた腐食生成物による潤滑作用が摩耗量を軽減していると考えられる．したがって，洋上浮体施設係留鎖は海水中に設置されることを勘案すれば，係留鎖の摩耗係数を求める際には没水条件下での摩耗試験が必要と考えられる．

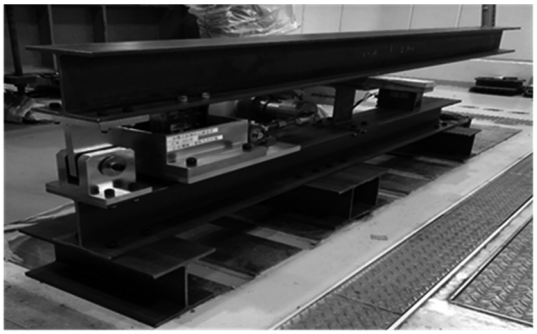
Table 1 Wear coefficient in the air and substitute ocean water[10].

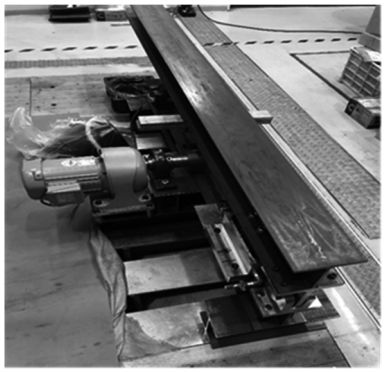
Material Grade		Wear coefficient ($\times 10^{-4}$)	
		In the air	In the substitute ocean water
Grade R3	Ave.	11	1.5
	Max.	83	10
	Min.	0.45	0.071
	S.D.	20	2.0
Grade R3S	Ave.	19	1.3
	Max.	100	6.1
	Min.	0.3	0.14
	S.D.	31	1.7

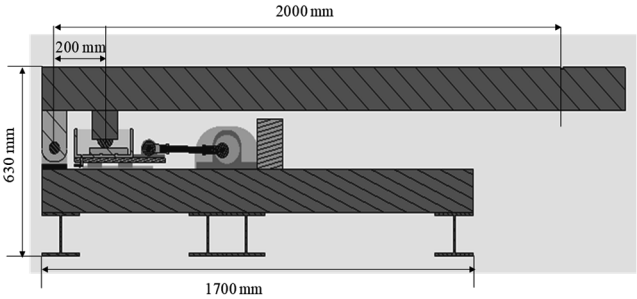
ピン・オン・ディスク摩耗試験では，得られた摩耗係数のばらつきが大きいことに加えて，試験片形状や応力レベルが実現象に即していないため，実海域における係留鎖間の接触状態を適切に再現できないという問題点を鑑み，本研究では新たな摩耗試験手法を提案する．本提案手法では，高荷重を用いた没水環境下での係留鎖表面間の摺動による摩耗試験が可能である．著者の一部ら [4] により行われた実機レベルに近い寸法を有する係留鎖の摩耗挙動を再現する摩耗試験では，呼び径 60 mm，破断張力 3514 kN の Grade R3S 係留鎖 [12] を用いて，実海域中において係留鎖に作用する張力を参照し，係留鎖間の張力を 60 kN と設定している．本研究においても実際の係留鎖間摩耗を可能な限り再現するべく，押付荷重を最大 10 kN 程度まで試験片に与えることが可能となっている．また，実際の係留鎖から切り出した試験片を用いて摩耗試験を行うことで，ピン・オン・ディスク摩耗試験では再現できなかった係留鎖表面での摩耗試験を可能にしている．本研究では提案手法を用いた摩耗試験を実施し，提案手法の有用性を確認するとともに摩耗量推定に必要なパラメータである摩耗係数を得ることを目的とする．

2. 摩耗試験機の諸元・試験方法

本研究で提案する摩耗試験機の外観および主要寸法を Fig. 1 に示す．本試験機は倍力機構，スライダークランク機構を有している．本試験機はレバー比を 1:10 と設定しており，0.98 kN (100 kgf)のウェイトを用いた場合，押付荷重 9.8 kN (1000 kgf) を試験片に与えることが可能である．







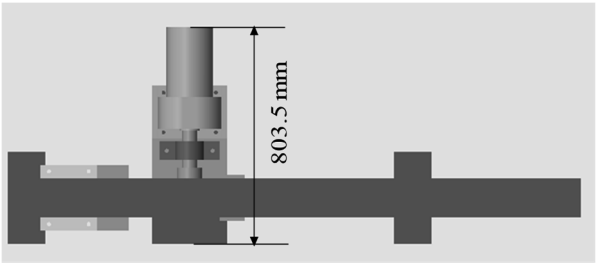


Fig. 1 Overview of the wear test machine.

スライダークランク機構部を Fig. 2 に示す．モーター部から連接棒を用いてリニアガイド上の水槽を設置している水平板に連結することで，モーターの回転運動を直線運動に変換し，水槽内の試験片を直線運動で摩耗させるという仕組みである．クランク腕の長さを 20 mm，連接棒長さを 288 mm としている．クランク腕長さから，水槽内に設置している試験片間で±20 mm 摺動する．モーター回転速度は 7.5 rpm と設定しており，摺動距離 100 m を得るのに約 2 時間 47 分要する．本試験機はピン・オン・ディスク摩耗試験とは異なりスライダークランク機構を用いていることにより摺動は加減速を繰り返して一定速度ではないという特徴がある．しかし，モーター回転速度を 7.5 rpm とした場合には摺動速度は 0～15.7 mm/s となり，その値は非常に小さい．そこで，本研究ではモーター回転速度を一定とし，摺動の加減速が摩耗試験結果に及ぼす影響は小さいものとして考慮していない．没水状態での摩耗試験において，著者の一部ら [10] により人工海水中と蒸留水中では摩耗量に有意差がないことを確認しているため，本研究では水槽内に蒸留水を満たした状態で試験を実施した．

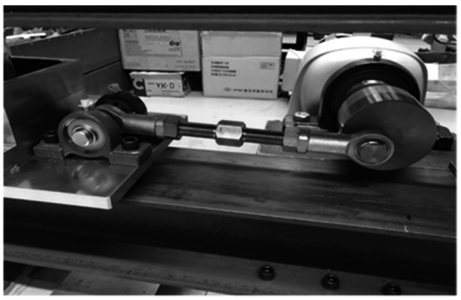


Fig. 2 Overview of the slider-crank mechanism.

本研究では，ABS 規格 [12] で規定された Grade R3 および Grade R3S の 2 種類の材料から，Fig. 3 に示すように係留鎖の平行部分から試験片を切り出して摩耗試験に供した．試験片は Fig. 4 に示す下部試験片，Fig. 5 に示す上部試験片の 2 つを取り付け方法に応じて設計・製作し，これら 2 つの試験片間で摩耗させている．下部試験片は水槽内に直接設置する．その際，直線運動に伴い試験片が動かないようにするため，下部試験片にはキー溝を掘っている．Fig. 6 に示すように，下部試験片のキー溝に対応するキーを水槽に取り付けることで，設置した際に試験片が動かないようにしている．Fig. 7 に両試験片を設置した様子を示す．上部試験片は水槽上部の H 型鋼に直接ボルトを用いて取り付けた．2 つの試験片を設置した後，水槽内を蒸留水で満たす．本試験では蒸留水の温度の制御は特に行わず，室温の雰囲気としている．試験機上部の H 型鋼に直接ウェイトを設置することで，倍力機構により試験片設置部に一定の押付荷重を付与し，摩耗試験を開始する．なお，試験片に作用する押付荷重は，水槽を取り外した状態で事前にロードセルにより計測を行い，目標値となるよう調整した．

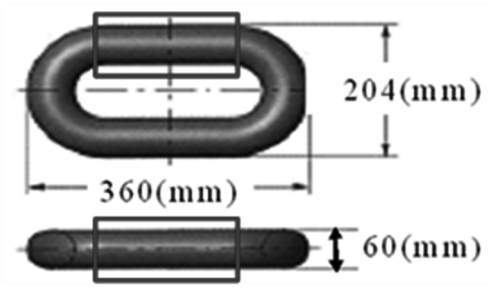


Fig. 3 Overview of collecting point of specimen.

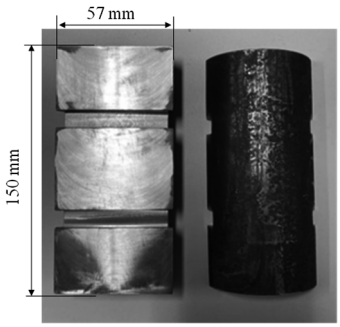


Fig. 4 Overview of the lower specimen.

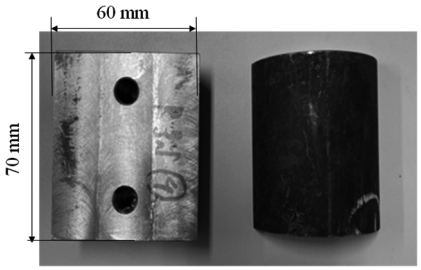


Fig. 5 Overview of the upper specimen.

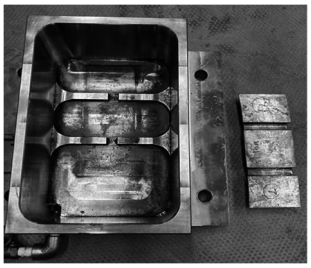


Fig. 6 Overview of the keyway for tank and lower specimen.

Fig. 7 Overview of installed specimens.

摩耗量の計測には，汎用電子天秤（A&D MC-6100，秤量 6100 g，最小表示 0.001 g）を用いた．試験後に試験片に付着した摩耗粉を流水で洗い流し，十分に乾燥させた上で計測を行い，試験前後の試験片の重量差により摩耗量を計測した．

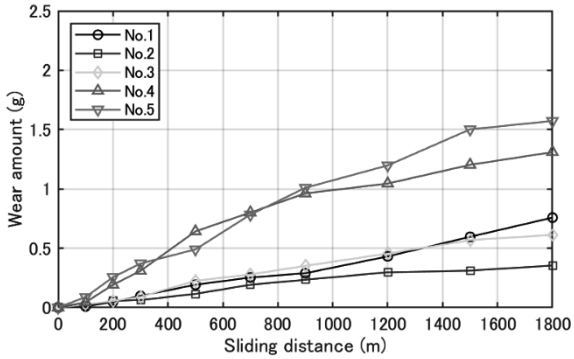
3. 摩耗試験 1（供試材 Grade R3）

摩耗試験 1 では Grade R3 係留鎖から抽出した試験片を用いる． 摩耗試験 1 における試験条件を Table 2 に示す．押付荷重 4.9 kN，9.8 kN の 2 通りの荷重の下で試験を行い，摩耗量と押付荷重の比例関係およびばらつきを確認する．摩耗遷移の特徴として摩耗初期は単位摩擦距離当たりの摩耗量である摩耗率が大きいシビア摩耗が生じ，摩耗が進むと摩耗率が大幅に小さくなるマイルド摩耗に遷移するとされている [13]．この現象はシビア・マイルド摩耗遷移と呼ばれている．ピン・オン・ディスク摩耗試験では摩耗進行に伴い接触面積は変化しないことに対して，本試験手法では用いる試験片の形状から摩耗進行に伴い接触面積が大きくなっていくという特徴がある．Archard ら [7] により摩耗量は見掛けの接触面積によらず荷重に比例することが確認されており，接触面積の変化は摩耗量に影響を及ぼさないと考えられる．鈴木ら [14] も，摩耗が進むことで接触面積が増加して面圧が減少し，単位面積当たりの摩耗量が減る一方，接触面積の増大は摩耗量を増やす効果があるとしている．両者の効果の結果として，総摩耗量は負荷荷重のみに依存してほぼ一定になるというように，同様の見解を示している．このことから，係留鎖試験片を用いた本試験においても，シビア・マイルド摩耗遷移が現れる可能性がある．そこで，シビア摩耗からマイルド摩耗への遷移を確認するため，摺動距離を試験初期は細かく区切り，総摺動距離を 1800 m と設定する．

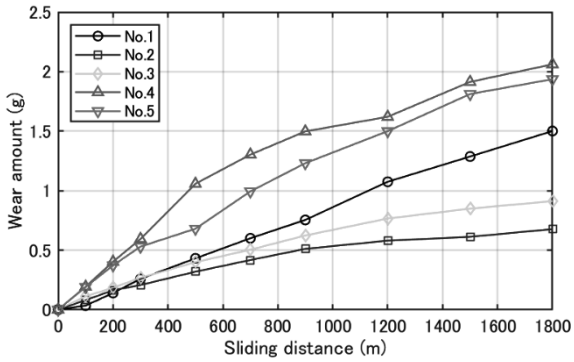
Table 2 Test conditions for Wear Test 1 (Material Grade R3).

Grade	Test No.	Load (kN)	Rotational speed (rpm)	Sliding distance (m)
R3	1	4.9	7.5	100 x 3
	2			200 x 3
	3			300 x 3
	4	9.8	7.5	
	5			

Fig. 8 に本試験で得た摩耗試験結果から，上部試験片および下部試験片のそれぞれについて，横軸に総摺動距離，縦軸に累積摩耗量を取る摩耗量進行曲線を示す．Fig. 8 から，下部試験片に比べ，上部試験片の方が総摩耗量が少ない傾向が確認される．



(a) Upper specimen



(b) Lower specimen

Fig. 8 Wear progression curves for each specimen (Material Grade R3).

Fig. 9 に試験片の摺動面の様子を示す．試験手法上，上部試験片よりも下部試験片の摺動面が大きくなる．水本ら [15] の研究によると，金属摺動面は，それ以外の表面に比べて腐食を受けやすい．また，腐食生成物は一般に表面への吸着力が弱く，摺動を受けると表面から離脱しやすいとされている．今回の試験方法では下部試験片の方が上部試験片よりも摺動面が大きく，蒸留水にさらされる時間が長くなる結果として腐食生成物が多くなり，上部試験片よりも摩耗量が大きくなったと考えられる．

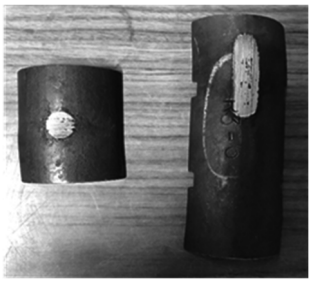


Fig. 9 Wear surfaces for each specimen.

Fig. 10 に両試験片の合計摩耗量を元に作成した摩耗量進行曲線を示す．押付荷重が 2 倍になると，累積摩耗量もほぼ 2 倍程度になっていることから，押付荷重と摩耗量の比例関係が確認できる．笹田 [13] によると，シビア摩耗とマイルド摩耗では単位摩擦距離当たりの摩耗量である摩耗率のオーダーは 2 桁程度異なり，マイルド摩耗遷移時には摩耗率の急変が生じるとされている．一方，Fig. 10 からは明確な摩耗率の急変は確認されないため，シビア・マイルド摩耗遷移は生じていないと考えられる．

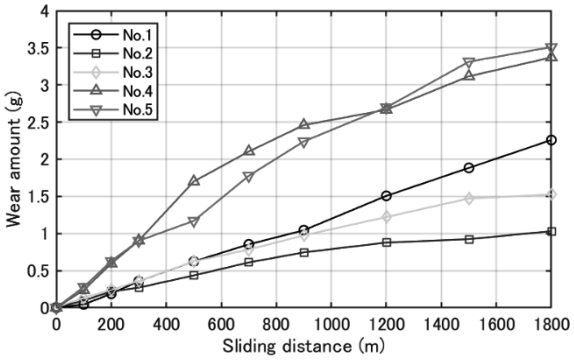


Fig. 10 Total wear progression curves for two specimens (Material Grade R3).

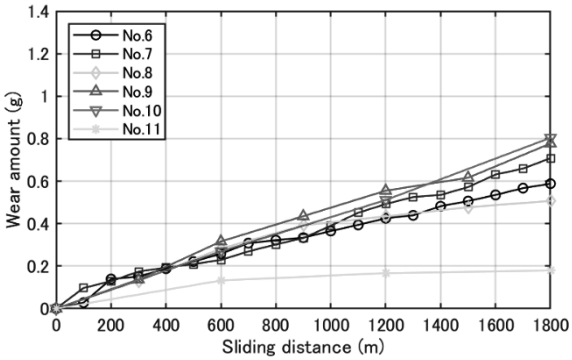
4. 摩耗試験 2（供試材 Grade R3S）

摩耗試験 2 では Grade R3S の試験片を用いる．摩耗試験 2 における試験条件を Table 3 に示す．本試験では，押付荷重 4.9 kN の下で試験を実施した．佐田 [16] によると，乾燥状態あるいは潤滑状態のいかんによらず 2 つの固体面を繰り返し摩擦することで生じる摩耗現象においてシビア摩耗からマイルド摩耗へ摩耗遷移するのは，摩耗面に摩耗粉が次第に堆積するためとされている．摩擦面を削り取り摩耗粉を除去した佐田に対し，平塚 [17] は摩擦面を保つために空気圧により摩耗粉を除去することで，シビア摩耗粉の摩擦面への再付着がより微細な摩耗粉の発生を促進し，マイルド摩耗粉の固着がマイルド摩耗を発現させると報告している．そこで，本試験では摩耗試験 1 では考慮していなかった摩耗面に堆積する摩耗粉の影響を調べるため，試験片毎に 1 計測当たりの摺動距離を固定し，摩耗面の堆積摩耗粉がある程度一定になるようにする．1 計測当たりの摺動距離が大きい方が試験中に摩耗面に堆積する摩耗粉の量が多くなり，マイルド摩耗への摩耗遷移について検証を行う．こちらも総摺動距離は 1800 m と設定する．

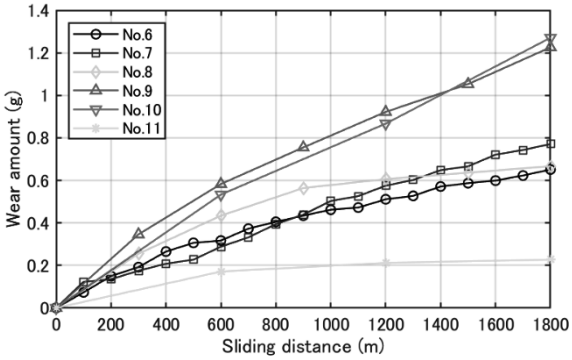
Table 3 Test condition for Wear Test 2 (Material Grade R3S).

Grade	Test No.	Load (kN)	Rotational speed (rpm)	Sliding distance (m)
R3S	6	4.9	7.5	100x18
	7			
	8			300x 6
	9			
	10			600x 3
	11			

Fig. 11 に摩耗試験 2 から得た摩耗試験結果から，上部試験片，下部試験片のそれぞれについての摩耗量進行曲線を示す．摩耗試験 1 の結果と同様に，上部試験片と比べ下部試験片の摩耗量が大きいという傾向が確認される．



(a) Upper specimen



(b) Lower specimen

Fig. 11 Wear progression curves for each specimen (Material Grade R3S).

Fig. 12 に両試験片の摩耗量を合計した摩耗量進行曲線を

示す．両試験片の合計摩耗量進行曲線 Fig. 12 から，計測間の摺動距離の増加による顕著な摩耗遷移は確認されなかった．没水環境下での摺動において上部試験片と水槽の相対運動から引き起こされる流れにより，摩耗遷移を引き起こすほど摩耗面に摩耗粉が堆積しなかったものと考えられる．そのため，実海域に設置される係留鎖においても潮流や相対運動が存在することから，シビア・マイルド摩耗遷移は生じない可能性がある．また，Fig. 10，Fig. 12 から，同一条件下での試験であるものの累積摩耗量や摩耗曲線の進行具合に相違があることを確認した．原因として，試験片設置箇所等のズレによるもの，試験片の表面状態の相違等が考えられる．より正確な摩耗係数を得るには，同一条件下であっても試験を多く行う必要があることが分かる．

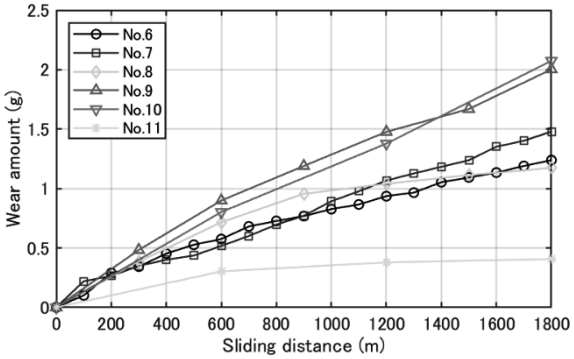


Fig. 12 Total wear progression curves for two specimens (Material Grade R3S).

ここで，Fig. 12 から，Test No. 11 において他の試験と比べて摩耗量が大幅に小さいことが確認される．原因として，Fig. 13 に示すように試験片に刻印があったことが確認されており，表面状態の影響から摩耗量に影響を及ぼしたことが考えられる．したがって本論文中では，Grade R3S の摩耗係数の算出の際，Test No. 11 のデータについては除外した上で摩耗係数を算出するものとする．

Fig. 13 Overview of engraving.

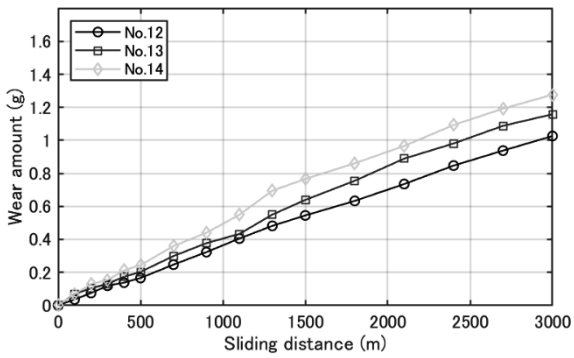
5. 摩耗試験 3（供試材 Grade R3S）

摩耗試験 1 及び摩耗試験 2 の試験結果を元に作成した摩耗量進行曲線から，シビア・マイルド摩耗遷移と思われる摩耗率の急変は確認されなかった．そこで，摩耗試験 3 では総摺動距離を更に伸ばし試験を行う．総摺動距離が大きくなることによる摩耗遷移の傾向を確認する．試験条件を Table 4 に示す．本試験では Grade R3S の試験片を用いる．総摺動距離は 3000 m と設定する．

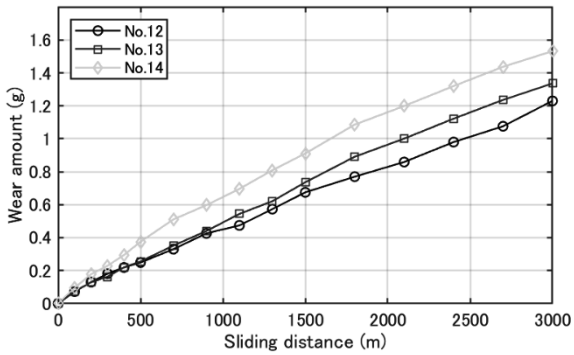
Table 4 Test condition for Wear Test 3 (Material Grade R3S).

Grade	Test No.	Load (kN)	Rotational speed (rpm)	Sliding distance (m)
R3S	12	4.9	7.5	100 x 5
	13			200 x 5
	14			300 x 5

Fig. 14 に摩耗試験 3 の試験結果から，上部試験片，下部試験片のそれぞれについての摩耗量進行曲線を示す．



(a) Upper specimen



(b) Lower specimen

Fig. 14 Wear progression curves for each specimen (Material Grade R3S).

続いて，Fig. 15 に両試験片の摩耗量を合計した摩耗量進行曲線を示す．両試験片の合計摩耗量進行曲線 Fig. 15 から，総摺動距離が大きくなることによる明確な摩耗遷移は確認

されなかった．没水状態での摩耗試験において，総摺動距離はシビア･マイルド摩耗遷移のような摩耗状態の遷移に影響を及ぼすことは無いと考えられる．

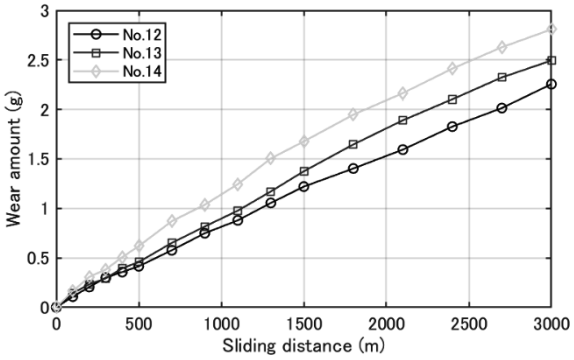


Fig. 15 Total wear progression curves for two specimens (Material Grade R3S).

6. 試験片への腐食作用

鋼に対して海水環境は強腐食性の環境であり，腐食が摩耗に及ぼす影響は無視できないものである．例えば，Table 1 に示すように腐食環境下における腐食生成物の潤滑作用により摩耗量の低減や，長期間曝露下における腐食作用のみによる損耗等が挙げられる．先行研究 [10] から人工海水環境と蒸留水環境では摩耗量に有意差がなかったことも考慮すれば，本試験で採用した試験片寸法レベルでは，人工海水環境と蒸留水環境で試験結果に有意な差は生じないと考えられる．そのため，本試験では蒸留水を用いることで簡易的に実機没水環境を再現している．本試験の摺動により生じる係留鎖間摩耗現象は，摩擦面における腐食生成物の発生と摩耗による新生面の曝露の繰り返しであり，実機においても同様な摩耗現象を生じることが推察される．しかし，本試験では，腐食生成物の削り取りも含めた摩耗による質量減少と，腐食による質量減少を区別していない．そこで，腐食作用が試験片の重量変化に及ぼす影響を考慮するために，試験片を蒸留水中に浸すことのみで生じる試験片の重量変化を確認した．試験片は Grade R3S の上下試験片を使用し，総摺動距離 1800 m に要する時間（約 50 時間）だけ蒸留水に浸し，前後の重量差を確認した．蒸留水に浸した後の試験片の様子を Fig. 16 に示す．試験片表面部分に腐食作用により錆が発生していることが確認された．ここで、摩耗試験 2 にて Grade R3S 材を用いて実施した摩耗試験結果（Test No.6～10）の試験前後の重量差と，蒸留水環境下における腐食作用のみから生じた試験片の試験前後の重量差を Test No.15 として Table 5 に示す．Test No.15 において重量がわずかに減少していることが確認される．ここで，試験片を摩耗させずに腐食のみで生じた重量変化は，実際に試験片を摩耗させた場合の平均重量変化の約 5%に当たる．そのため，本研究においては没水環境下で試験片を摩耗させた際に生じる重量変化における腐食の影響は小さいものと考え，摩耗係数を算出する際は試験片の重量変化そのものを摩耗量とした．

Fig. 16 Overview of rust forming.

Table 5 Comparison of mass change between wear tests and corrosion test.

Wear machine condition	Grade	Test No.	Mass change (g)		Total mass change (g)
			Upper	Lower	
Under Operated	R3S	6	0.588	0.651	1.239
		7	0.708	0.771	1.479
		8	0.507	0.667	1.174
		9	0.777	1.226	2.003
		10	0.804	1.271	2.075
	Average				1.594
Without Operated	R3S	15	0.025	0.060	0.085

7. 摩耗係数の同定

摩耗試験結果から摩耗係数を算出する．摩耗係数を求めるため，比摩耗量の式(2)と Holm[18] の摩耗式(3)から，摩耗係数の導出式(4)を導出することができる．

$$W_s = \frac{W_1 - W_2}{PL\rho} \tag{2}$$

$$V = KL\frac{P}{H} \tag{3}$$

$$K = HW_s \tag{4}$$

ただし，

V ：摩耗体積 [mm^3]

W_s ：比摩耗量 [mm^2/N]

W_1 ：試験前の質量 [g]
W_2 ：試験後の重量 [g]
P ：荷重 [N]
L ：摺動距離 [mm]
ρ ：密度 [g/mm^3]

ここで，式(4)に含まれるビッカース硬さは材料物性値であるため，摩耗試験片の一部を用いてビッカース硬さを計測した．計測には微小硬度計 MVK-H0（明石製作所製）を用いた．ビッカース硬さは試験力の単位は kgf として規定されている[19]が，摩耗係数を無次元値とするために試験力の単位を N に換算した値としている．

Fig. 8，Fig. 11，Fig. 14 に示した各試験片の摩耗量進行曲線から，最小二乗法により原点を通る近似直線を作成した．近似直線の傾き$\Delta W/L$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求め，それらを平均したものを摩耗係数として算出した．Table 6 に最終的に得た試験ごとの摩耗係数を示す．

本研究で得た摩耗係数は，Table 1 に示す著者の一部ら[10]により行われた人工海水潤滑下でのピン・オン・ディスク摩耗により得られた摩耗係数の平均値よりも 1/5 程度小さくなっている．摩耗係数が小さくなった原因として，ピン試験片がエッジ形状を有するピン・オン・ディスク摩耗試験では試験片のわずかな傾きによりディスク試験片の切削が生じる可能性があり，摩耗量が過大となっていた可能性が考えられる．一方，本研究に用いた試験片では切削が生じなかった結果，ピン・オン・ディスク摩耗試験結果と比べて摩耗量が小さくなったと考えられる．また，Table 1 に示したピン・オン・ディスク摩耗試験の結果と比較して摩耗係数のばらつきも小さくなっており，標準偏差が Grade R3 で約 1/27, Grade R3S で約 1/21 であった．これらのことから，今回の摩耗試験により，従来手法と比較して精度よく摩耗係数を算出することができたと考える． また，本試験手法で得た摩耗係数の実機への適用可能性について説明する．著者の一部ら[4]により行われた係留鎖間摩耗試験結果と有限要素解析による摩耗量推定結果の比較において，摩耗量推定にはピン・オン・ディスク摩耗試験から得られた摩耗係数を用いており，係留鎖間摩耗結果を比較的精度よく推定可能であるとしている．これを受けて定量的な摩耗量推定手法の提案を行った著者の一部ら[20]は，スパー型浮体に対して本試験機から得られた摩耗係数による摩耗量推定と実測値との比較からその有用性を確認している．このことから，実際の係留鎖間の摩耗を再現した本試験手法から得た摩耗係数を実機へ適用することは可能であると考えられる．

8. 結 論

本研究では，係留鎖の摩耗量推定に必要な摩耗係数についての実験的検討を実施した．本試験方法では摩耗の特徴であるシビア・マイルド摩耗遷移や，摩耗面に堆積する摩耗粉の影響を明確に確認することはできなかったが，先行研究で得られていた摩耗係数よりもばらつきの小さい摩耗係数を得ることができ，提案手法の有用性を確認した．

今後，摩耗係数の精度をより向上させていくために，更に試験を重ねてデータを蓄積する必要がある．また，係留鎖表面状態が摩耗に及ぼす影響を調べるため，3D スキャナを用いて表面状態を再現し，有限要素解析による摩耗解析と摩耗試験結果との比較なども実施する予定である．

謝 辞

本研究は，日本財団による海洋開発に係る日本-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」（令和元年～4 年）の一部として実施したものである．また，本研究に当たり九州大学工学部技術部技術専門職員 村上幸治氏には，試験機の設計など多岐に渡り御助言を頂きました．心より感謝申し上げます．また，摩耗試験機を製作頂いた石丸機械工業株式会社，試験に供したチェーンリンク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) Yaghin, A. L. and Melchers, R. E.: Long-term inter-link wear of model mooring chains, Marine Structures, Vol. 44, pp. 61-84, 2015.
2) Gordon, R. B., Brown, M. G., and Allen, E. M.: Mooring Integrity Management, Proceedings of OTC, OTC-25134-MS, 2014.
3) Utsunomiya, T., Sato, I., Kobayashi, O., Shiraishi, T., and Harada, T.: Numerical Modeling and Analysis of a Hybrid-Spar Floating Wind Turbine, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Vol. 141, No. 3, pp. 031903 (5 pages), 2019.
4) Gotoh, K., Nakagawa, M., Murakami, K., and Utsunomiya, T.: Effect of Tensile Force for Wear Performance of Mooring Chain, Proceeding of OMAE, OMAE2018-77960, 2018.
5) https://www.mscsoftware.com/ja/product/marc (accessed on 25 May 2021).
6) Archard, J. F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces, Journal of Applied Physics, Vol. 24, pp. 981-988, 1953.
7) Archard, J. F., and Hirst, W.: The wear of metals under unlubricated conditions, Proc. Roy. Soc., Vol. 236, Issue 1206, pp. 397-410, 1956.
8) Jayasinghe, K., Potts, A., Kilner, A., and Melchers, R.: Mooring Chain Wear Experiments and Findings, Proceedings

of OTC, OTC-28737-MS, 2018.
9) Rabinowicz, E.: The Wear Coefficient – Magnitude, Scatter, Uses, Journal of Lubrication Technology, Transaction of ASME, Vol. 103, pp. 188-194, 1981.
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) Hida, A.: On the Corrosive Wear, Journal of Japan Society of Lubrication Engineers, Vol. 30, Issue 7, pp. 467-471, 1985 (in Japanese).
12) American Bureau of Shipping: Guide for Certification of Offshore Mooring Chain, 1999.
13) Sasada, T.: Wear, Yokendo, 2008 (in Japanese).
14) Suzuki, H., Michihiro, A., Ookubo, H., and Ootake, A.: Wear of Shallow Water Moorings for a Floating Offshore Wind Turbine, Journal of the Japan Society of Naval Architests and Ocean Engineers, Vol. 27, pp. 133-138, 2018 (in Japanese).
15) Mizumoto, M. and Usami, K.: Why does the Wear occur?, Journal of Turbomachinery Trans. ASME, Vol. 24, Issue 143, pp. 267-273, 1996 (in Japanese).
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) Holm, R.: Electrical Contacts 1st ed, Gerber Stockholm, 1946.
19) JIS Z 2244:2009, Vickers hardness test-Test method, 2009 (in Japanese).
20) 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,pp. 102927(26 pages), 2021.

Table 6 Wear coefficient.

Grade	Test No.	Applied load (kN)	$\Delta W/L$ (x10^{-6} g/mm)	Specific wear (x10^{-8} mm^2/N)	Hardness (N/mm^2)	Wear coefficient: K (x10^{-4})
R3	1	4.9	0.620	1.61	2590	0.417
	2	4.9	0.333	0.865		0.224
	3	4.9	0.478	1.24		0.322
	4	9.8	1.10	1.43		0.370
	5	9.8	1.09	1.42		0.367
Average						0.340
Standard deviation (S.D.)						0.073
R3S	6	4.9	0.380	0.989	3000	0.297
	7	4.9	0.426	1.11		0.332
	8	4.9	0.393	1.02		0.306
	9	4.9	0.589	1.53		0.459
	10	4.9	0.582	1.51		0.454
	11	4.9	(0.271)	(0.352)		(0.106)
	12	4.9	0.384	0.996		0.299
	13	4.9	0.437	1.14		0.341
	14	4.9	0.510	1.32		0.397
Average						0.363
Standard deviation (S.D.)						0.072

※Test No.11 is excluded from sample.