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

洋上浮体係留鎖の比摩耗量に関する実験的検討

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

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

中川，将孝
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 ： 修士課程

山根，和樹
九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 ： 修士課程

https://hdl.handle.net/2324/4794500

出版情報：Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. 28, pp.145-154, 2018-12. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

洋上浮体係留鎖の比摩耗量に関する実験的検討

正会員　後　藤　浩　二*　　正会員　　宇都宮　智　昭*
正会員　中　川　将　孝**　　学生会員　山　根　和　樹***

Experimental Study on Specific Wear of Mooring Chain for Floating Structure

by　Koji Gotoh, *Member*　Tomoaki Utsunomiya, *Member*
Masataka Nakagawa, *Member*　Kazuki Yamane, *Student Member*

Summary

Floating wind turbine facilities, which are installed in the deep sea area, play an essential role to promote the green energy application. One of the problems associated with the commercialization of facilities installed in the deep sea is the reduction of the maintenance cost of mooring chain. Therefore, it is necessary to establish a quantitative wear evaluation method for mooring chains. Specific wear is one of the essential physical parameter to evaluate the wear performance of metals. However, detailed investigation of the specific wear of the mooring chain has not been performed yet. The pin-on-disk wear tests were performed to measure the specific wear in the air and in the substitute ocean water. As a result of experiments, it has been confirmed that the specific wear in the substitute ocean water was remarkably smaller than in the air, and the wear state was stable.

1. 緒　　言

浮体式洋上風力発電施設の実用化に向け解決すべき主要課題の一つに，設置および係留コストの削減が指摘されている．これに応えるべく，著者の一部ら[1)]は，砂地盤の多い日本周辺海域への浮体式洋上風力発電設備の展開を念頭に，サクションアンカーと係留ラインの一部に合成繊維索を導入した係留システムを提案し，本システムの有効性を実海域において検討している．

洋上浮体施設係留システムの健全性は，継続的な稼働が要求される FPSO 等の資源生産貯留設備では特に重要視されており，係留システムを構成する鎖，ワイヤーロープなどの損傷事故に関する報告資料[2)]も発表されている．これらの報告によると，潮流の強い海域に一点係留される設備では，触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，この結果，鎖に面外繰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．同現象については，実機寸法の連結鎖を用いた原因調査並びに設計指針検討の報告[3)~5)]もある．また，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[6)]．特に温暖な海域では腐食が主要因となりやすい．FPSO 等の係留システム損傷に関する過去の知見，緊張係留式スパーブイの係留鎖における過大な摩耗損傷の事例[7)]および，三点カテナリー係留方式である著者の一部ら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[1)]では FPSO 等と比べると触れ回り運動は十分小さく，係留鎖に対する面外繰返し曲げによる低サイクル疲労は問題とはならないことを勘案すれば，係留システムの健全性確保のためには，係留鎖の摩耗量評価手法の確立が重要である．係留鎖の摩耗量評価手法が確立できれば，係留システムのメンテナンス費用の削減，さらには浮体設備設置前段階における適切な検討により，係留鎖のメンテナンスフリー化を目指すことも可能となる．

係留鎖摩耗に関して Yaghin と Melchers[6)]は，FPSO における浮体部との連結部に近い場所で生じる摩耗現象を評価対象と想定し，鎖断面直径 16mm の Stud link を用いた摩耗試験結果を報告しているが，小型の鎖を用いている上に鎖間張力が摩耗量に影響を及ぼすことを指摘するなどの実験結果の分析に留まっており，摩耗量推定手法に関する言及は無い．

著者の一部ら[8),9)]は，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実験装置の構築，及び有限要素解析による摩耗量の推定を試みている．また，著者の一部ら[10)]は弛緩係留方式ブイの係留鎖で生じた摩耗損傷について，汎用

*　九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門
**　戸田建設（株）（研究当時九州大学大学院工学府建設システム工学専攻修士課程）
***　九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻修士課程
原稿受理　平成　年　月　日

応答解析ソフト OrcaFlex[11]を用いた浮体－係留系全体応答解析により規則波中および不規則波中での係留鎖に作用する張力や摺動角を算出し，上記実験装置を用いた摩耗試験結果により得られた知見に基づく簡易推定式に適用することで，摩耗量推定も試みている．これらの研究の中で数値解析による摩耗量推定に関しては，必要不可欠な入力情報である係留鎖の比摩耗量という物性値に関する知見の蓄積は著者らが調べた範囲では，公知資料としてはほとんど無いため，摩耗量の推定精度に課題が残されている．なお，比摩耗量は標準的な試験法により測定してもバラツキが大きい [12]ことが知られている．

洋上浮体では，より断面直径が大きい鎖が係留に用いられることに加え，小径の鎖であっても水中環境下で摩耗試験を実施することは困難であることから，実機サイズの鎖を用いた水中環境下における摩耗実験を積み重ねて耐摩耗性能評価に関する知見を蓄積することは非常に困難である．これらの状況を勘案すれば，有限要素解析等の数値解析技術を実機サイズの鎖を用いる摩耗試験として代用することが有用である．一方，数値解析の妥当性を検証するには，可能な範囲で実機サイズに近い寸法の鎖を用いた摩耗実験との比較検証も必要不可欠である．そこで著者らは以下の順序で，洋上浮体係留鎖の摩耗挙動評価を行うことを考えた．

(1) 大気環境において，実機サイズレベルの鎖を用いた摩耗挙動を有限要素解析にて推定し，実測結果と比較することで解析手法の妥当性を確認．
(2) 摩耗部に人工海水を連続滴下する環境において，実機サイズレベルの鎖を用いた摩耗挙動を有限要素解析にて推定し，実測結果と比較することで解析手法の妥当性を確認．
(3) 供試鎖が蒸留水に完全没水する環境において，実機サイズレベルの鎖を用いた摩耗挙動を有限要素解析にて推定し，実測結果と比較することで解析手法の妥当性を確認．
(4) 供試鎖が人工海水に完全没水する環境において，実機サイズレベルの鎖を用いた摩耗挙動を有限要素解析にて推定し，実測結果と比較することで解析手法の妥当性を確認．

上記（3），（4）については先行研究が無い上に，著者らの予備検討の結果，鎖間摺動を再現する動力機構そのものを没水させる必要があることから，装置構成に困難が伴う．また，Yaghin と Melchers[6]による実験や，海洋構造物関係の JIP の一貫として実施された実験 [13]も，上記（1）の条件下での実施にとどまっているうえ，この環境においてさえも数値解析による定量的な摩耗量検証は達成できていない．この原因の一つが，上述した比摩耗量に関する知見の欠如にあると考えられる．

そこで本研究では，まず上記（1）の課題を達成するために，係留鎖供試材料に対して大気環境中における比摩耗量を実測，分析した．また，（2）以降の課題の解決に資するため，一部ではあるが人工海水や蒸留水環境における比摩耗量測定，分析も実施した．

2. 大気中における摩耗係数

2.1 試験方法

素材の摩耗特性を調べるための試験（以下，摩耗試験と称する）として種々の方法が規格化されているが，本研究では実績の多いピン・オン・ディスク摩耗試験を適用した．同試験方法は，ディスク試験片にピン試験片を一定負荷荷重のもとで垂直に接触させながら，ディスク試験片をその中心軸周りに回転させて摺動させる方式である．ピン試験片への負荷はおもりを乗せることで与える．試験方法は，日本機械学会（JSME）基準「摩耗の標準試験方法（改訂版）」[12] に準拠した．試験機は株式会社レスカ製のフリクションプレーヤ [14]を使用した．試験機外観を Fig.1 に示す．

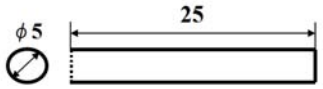
JSME 基準 [12]ではピン試験片の長さに関して「特に規定しない」としており，ピン試験片とディスク試験片の接触状態の観察ならびに摩耗の過度の進行による試験機の破損防止を目的として，ホルダから先端までの長さとして 9mm を標準として実施した．一方，JSME 基準 [12]では，ホルダから先端までの長さとして 3mm 以下が望ましいとの記載もあるため，突出長さ 3mm の場合と 9mm の場合で同等の結果が得られることを別途，予備実験により確認した [15]．

(a) Appearance (b) Pin and disk holding section

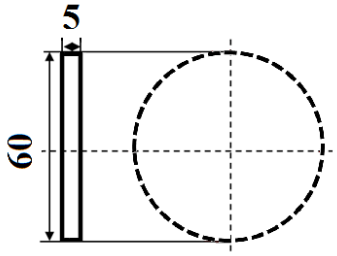
Fig.1 Pin-on-disk wear test machine used.

摩耗量測定には電子天秤を用いた．使用した電子天秤の分解能は 0.1 mg であるが，今回測定器の扉を開けた状態で放置すると-2 mg～15 m g 程度の測定誤差が生じた．また，測定前後の扉開閉時に±2 mg 程度の変動が生じる場合があった．加えて，試験片セット直後にも±0.1 mg 程度の微小な値の変動が生じた場合が散見されたため，試験片セット後 1 分後以降で測定値が一定値を示した状態であることを確認後に重量計測を行うことで，上述の変動を極力抑制した．

供試材は, ABS 規格[16]で規定された Grade R3 および Grade R3S（断面公称直径 60mm）の Studless link から抽出した．なお，ディスク試験片を鎖の曲がり部から，ピン試験片を平行部から抽出した．摩耗試験片の形状を Fig. 2 に示す．図中の点線部分は鎖の摺動時に実際に摩耗を生じる面と熱処理等の冶金的状況が出来るだけ近くすることを目的に, 鎖表面をそのままの面として残した箇所である．



(a) Pin specimen.



(b) Disk specimen.

Fig. 2 Specimen configurations (unit in mm).

比摩耗量は次式に従って算定した．

$$W_S = (W_1 - W_2)/PL\rho \qquad (1)$$

ここで,

W_s：比摩耗量

W_1：試験前の試験片質量

W_2：試験後の試験片質量

P：負荷荷重

L：摺動距離

ρ：試験片の密度

である．

2. 2　試験 1（素材 Grade R3S）

Table 1 に示すように負荷荷重，摺動様式，回転（または往復）速度および試験時間を変更させて摩耗試験を実施した．本試験では供試材として Grade R3S の鎖を用いた．回転（または往復）速度はピン試験片が試験期間中に安定してディスク試験片との接触を保ちつつ, 試験時間短縮の観点から設定した．回転半径は全て 28mm，往復運動は角度 90°の範囲とした．なお，往復方式は回転方式に比べて摩耗現象に対して若干シビアな条件になると言われている[17]．

以上の測定情報を式（1）に代入して比摩耗量を求めた．個々の試験片に対する比摩耗量の値と統計値（平均値，最大値，最小値，標本に基づく標準偏差及び，標本平均の標準誤差．以降の「統計量」も同様）を Table 1 に示している．なお，日本機械学会（JSME）基準「摩耗の標準試験方法（改訂版）」[12]では比摩耗量を有効数字 2 桁で与えるように規定されているため, 本研究で算定した比摩耗量はすべてこれに従った．

比摩耗量を求めるには供試材の密度が必要である. ディスク試験片は鎖の曲がり部から取り出したために断面形状が真円ではなく，体積測定精度が良好でないため，3 体のピン試験片に対する試験前の質量と体積から供試材の密度を求め，これらの平均値（7.85×10^{-3} g/mm^3）を用いて比摩耗量を計算した．なお，一部のピン試験片（1-7 及び 1-9）では負の値を示した．この理由は，一方の試験片の摩耗粉が他方の試験片に移着したことや, 電子天秤の誤差による結果であると推察される．これら負の値を示した実験の測定結果（同時に使用したピン及びディスク試験片の両者とも. 該当する実験には表に灰色を付した．以下の表も同様）は統計量の計算に際して除外した．

求めた比摩耗量の数値, 標準偏差及び標準誤差を参照すると, 同一試験条件でも比摩耗量に大きなバラツキが生じていることが確認できる．この理由として，2,000g という負荷重量がシビア摩耗とマイルド摩耗の遷移荷重に対応する可能性が挙げられる．また，回転運動に比べ往復運動の方が若干多く摩耗した. この理由は同一箇所の繰り返し摩擦数が回転運動に比べ 4 倍であることに起因すると考えられ, 往復方式は回転方式に比べて摩耗現象に対して若干シビアな条件になる[17]という一般的な知見とも一致する傾向を確認した．

Table 1 Test conditions of test 1 (Material Grade R3S, in the air).

Specimen ID	Sliding pattern	Weight (gf)	Rotational (Reciprocating) speed (rpm)	Test period (s)	Total sliding distance (mm)	Mass change (x10^{-3} g)		Specific wear (x10^{-7} mm^2/N)	
						Pin	Disk	Pin	Disk
1-1	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	8.2	16.7	2.1	4.3
1-2	Round-trip	1,000	24	7,200	506,676	7.4	13.3	1.9	3.4
1-3	Rotation	1,000	24	3,600	253,338	0.2	0.6	0.10	0.31
1-4	Rotation	2,000	12	3,600	126,669	1.9	7.8	0.97	4.0
1-5	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	40.3	42.1	10	11
1-6	Rotation	2,000	24	3,600	253,338	0.5	1.3	0.13	0.33

1-7	Rotation	2,000	24	3,600	253,338	-1.2	2.5	-0.31	0.64
1-8	Rotation	2,000	24	3,600	253,338	2.7	2.0	0.69	0.51
1-9	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	-0.3	0.4	-0.15	0.21
1-10	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	5.0	2.1	1.3	0.54
1-11	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	2.1	5.4	0.54	1.4
1-12	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	11.3	129	29	33
1-13	Round-trip	500	24	3,600	253,338	2.5	5.3	2.6	5.4
1-14	Round-trip	500	24	3,600	253,338	0.5	1.0	0.51	1.0
1-15	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	2.6	8.0	1.3	4.1
1-16	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	117	141	30	36

Statistic values of specific wear ($x10^{-7}$ mm^2/N)			
	Pin	Disk	Total
Average	5.8	7.5	6.7
Maximum	30	36	36
Minimum	0.10	0.31	0.10
Standard deviation	10	12	11
Standard error of mean	2.8	3.2	2.1

(Note) These values were calculated by ignoring specimen IDs 1-7 and 1-9.

2. 3　試験 2（素材 Grade R3）

2.2 で述べた試験 1 の結果は，（1）回転速度や試験時間が試験結果に明確には影響を及ぼさない，（2）回転運動に比べ回転往復運動の方が多く摩耗を生じる，という傾向を示唆したため，往復摺動，回転半径 28mm，往復運動の回転角 90°，往復速度 24rpm，試験時間 3,600s，摺動距離 253,338mm と条件を固定し，負荷重量のみ複数条件としたピン・オン・ディスク摩耗試験を実施し，比摩耗量を計算した．本試験では供試材として Grade R3 の鎖を用いた．供試材の密度は試験片番号 2-1～2-4 のピン試験片に対して求めた平均値（7.81×10^{-3} g/mm^3）を用いて比摩耗量を計算した．以降の Grade R3 材についても同じ密度の値を用いて計算した．

試験条件及び結果，比摩耗量の統計値を Table 2 に示す．Table 2 に示すように，負荷重量 2,000g で実施した 8 回の試験では，比摩耗量がピン試験片，ディスク試験片共に大きなバラツキを示したが，統計量でみると試験 1 と比較してバラツキの小さな結果が得られたと判断できる．

Table 2 Test conditions of test 2 (Material Grade R3, in the air).

Specimen ID	Sliding pattern	Weight (gf)	Reciprocating speed (rpm)	Test period (s)	Total sliding distance (mm)	Mass change ($x10^{-3}$ g)		Specific wear ($x10^{-7}mm^2/N$)	
						Pin	Disk	Pin	Disk
2-1	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	1.30	1.2	0.33	0.31
2-2	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	0.8	5.1	0.21	1.3
2-3	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	2.2	2.2	0.57	0.57
2-4	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	1.0	0.6	0.26	0.15
2-5	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	10.1	1.0	2.6	2.7
2-6	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	81.1	86.9	21	22
2-7	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	3.0	4.3	0.77	1.1
2-8	Round-trip	2,000	24	3,600	253,338	89.0	112	23	29
2-9	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	3.9	3.5	2.0	1.8
2-10	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	3.3	3.2	1.7	1.6
2-11	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	5.6	8.0	2.9	4.1
2-12	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	2.9	5.4	1.5	2.8
2-13	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	1.8	3.5	0.93	1.8
2-14	Round-trip	1,000	24	3,600	253,338	5.0	3.9	0.26	2.0
2-15	Round-trip	500	24	3,600	253,338	2.2	7.5	2.3	7.7
2-16	Round-trip	500	24	3,600	253,338	1.3	4.5	1.3	4.6

2-17	Round-trip	500	24	3,600	253,338	0.6	0.9	0.62	0.93
2-18	Round-trip	500	24	3,600	253,338	1.0	1.4	1.0	1.4
2-19	Round-trip	750	24	3,600	253,338	0.4	0.6	0.27	0.41
2-20	Round-trip	750	24	3,600	253,338	1.5	3.4	1.0	2.3

Statistic values of specific wear (x10^{-7} mm^2/N)			
	Pin	Disk	Total
Average	3.2	4.3	3.8
Maximum	23	29	29
Minimum	0.21	0.15	0.15
Standard deviation	6.5	7.5	6.9
Standard error of mean	1.4	1.7	1.1

2. 4　摩耗係数の同定

2.2，2.3 に示した比摩耗量の測定結果より各材料の摩耗係数を同定する．比摩耗量のバラツキが大きいことを考慮し，摩耗係数の最大値，平均値，最小値を求める．摩耗係数 K は次式で与えられる [18]．

$$K = W_S \, p_m \qquad (2)$$

ここで，

K：摩耗係数

W_s：比摩耗量

p_m：摩擦する二面のうち，柔らかい方の押し込み硬さである．

p_m は，摩擦面が塑性流動を生じる圧力と解釈され，栗田と山縣 [19]は，p_m は押し込み硬さで近似できると説明している．また，水本と宇佐美 [20]は，p_m は材料が完全に塑性変形した時の接触応力（材料の圧縮降伏応力）であり，材料のビッカース硬さとほぼ同等と説明している．これらの説明を参照し，かつ測定の容易さを考慮して，p_m としてビッカース硬さの値を用いて摩耗係数を与えることにした．ビッカース硬さは試験力をくぼみ表面積で除した値に比例する値として定義される [21]ため，比摩耗量との積として与えられる摩耗係数は無次元値と解釈できる．ただし，ビッカース硬さは試験力の単位が kgf として規定されているため，2.2 までに求めた比摩耗量の単位（mm^2 / N）を考慮して試験力の単位を N に換算した値とする．

ビッカース硬さは，ディスク試験片のできるだけ外縁部に近い箇所（外縁から 2mm の位置）の 180°対称位置において，Grade R3 材では試験片 3 枚（計測点合計 6），Grade R3S 材では試験片 5 枚について計測した．Table 3 に結果を示すが，これに示した平均値を摩擦係数の算定に用いた．なお，鎖断面内で硬さ分布にバラツキが生じているか否かを確認するため，Grade R3 材及び R3S 材それぞれ一体について，Fig.3 に示すように試験片内の複数点で硬さ測定を行い，バラツキの程度を調査した．Fig.3 中の点 A1 及び A3 がすべての試験片における測定位置であり，その他の点はバラツキ影響の確認のための測定点である．点 A2，A4 は点 A1，A3 と同様に外縁から 2mm の位置，点 C は中心，点 B1～B4 は点 A1～A4 と点 C の半径方向中間位置である．なお，点 A1 が摩耗を評価する必要がある相互の鎖が接触している内側部分に相当する．測定結果を Table 4 に示す．平均値と標準偏差については，外周部のみ（点 A1～A4）及びすべての測定点について，それぞれ求めた．これらの結果を参照する限り，通常の鋼材における硬度測定実績と比較しても著しいバラツキは示していないと判断し，以降の検討では Table 3 に示した値を用いた．

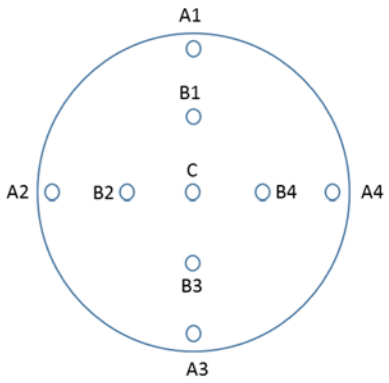


Fig. 3 Measured points of Vickers' hardness to investigate the scattering.

Table 3 Vickers hardness of applied materials.

Material grade	Disk ID	Measurement point	Vickers hardness (kgf / mm^2)	Vickers hardness (N / mm^2)
R3	1	A1	265	2,599
		A3	264	2,589
	2	A1	261	2,560
		A3	259	2,540
	3	A1	257	2,520
		A3	272	2,668
	Average		263	2,579
	Standard deviation		4.86	47.71

R3S	1	A1	319	3,128
		A3	293	2,873
	2	A1	291	2,854
		A3	335	3,285
	3	A1	268	2,628
		A3	285	2,795
	4	A1	288	2,824
		A3	293	2,873
	5	A1	291	2,854
		A3	291	2,854
	Average		295	2,897
	Standard deviation		17.6	172.9

Table 4 Vickers hardness distribution in applied materials.

Measured point	Grade R3	Grade R3S
A1	260	291
A2	249	281
A3	241	298
A4	237	282
B1	255	282
B2	263	306
B3	249	283
B4	244	261
C	248	298
Average (A1~A4)	247	288
Average (all)	250	287
Standard deviation (A1~A4)	10.1	8.04
Standard deviation (all)	8.55	13.2

以上の情報から同定した大気中における摩耗係数の最大値，平均値，最小値及び標準偏差を Table 5 に示すが，両材料に対して測定された比摩耗量及び摩耗係数のバラツキは同程度であった．

Table 5 Wear coefficient of each material in the air.

Material grade		Specific wear ($x10^{-7}$ mm^2/N)	Wear coefficient ($x10^{-4}$)
R3	Ave.	3.8	11
	Max.	29	83
	Min.	0.15	0.45
	S.D.	11	20
R3S	Ave.	6.7	19
	Max.	36	100
	Min.	0.10	0.3
	S.D.	11	31

3. 人工海水中における摩耗係数

3.1 人工海水中での摩耗試験

前章では素材特性としての摩耗挙動を調査する観点から，大気中で摩耗試験を実施したが，洋上浮体設備係留の健全性担保の観点に立てば，係留鎖の稼働環境である海水中での摩耗挙動の解明が必要である．鋼に対して海水環境は強腐食性の環境であり，摩耗に伴い新生面が連続的に曝露し続けることや，海域によっては鎖の腐食は損傷の主要因であることから，係留鎖のメンテナンスフリー化を目指すためには，海水中での鎖の摩耗挙動を定量的に評価することが必要である．金属の腐食形態として全面腐食，孔食，隙間腐食など知られており，腐食と摩耗を相互に考慮したメカニズムに関して種々の研究成果[22)~24)]が報告されているが，海水中での係留鎖の比摩耗率に関する定量的な報告事例は著者らの調査した範囲では無い．

そこで，本研究では海水中でピン・オン・ディスク摩耗試験を実施し，係留鎖の比摩耗率の測定を行った．海水としては準備の利便性や溶液の性質を一定に保持した実験を実施するという観点から，ASTM-D1141[25)]に準拠して pH8.2 に調整した人工海水を使用した．試験では，ピン試験片とディスク試験片の接触部が試験の全期間に渡って大気中に曝露されることなく，かつ摺動に起因する飛散や自然蒸発により海水が不足しない水量で試験を行った．なお，溶液の温度の制御は特に行わず，室温の雰囲気で行った．また，試験片寸法は Fig.1 と同じであるが，材種は Grade R3 及び Grade R3S の両者について試験を行った．

試験条件および試験結果を Grade R3 について Table 6 に，Grade R3S について Table 7 に示す．なお，回転半径は予備実験を行い摺動に伴う海水飛散を確実に抑えることが可能であることを確認した 26 mm に設定した．また，試験終了後は試験片表面に錆びた摩耗粉が付着したため，試験片に付着した水分と摩耗粉を拭き取り後，アセトンで丁寧に拭きあげ，最後は温風で風乾させた後に，試験片重量を測定した．海水中でのピン・オン・ディスク摩耗試験の様子を Fig. 4 に示す．

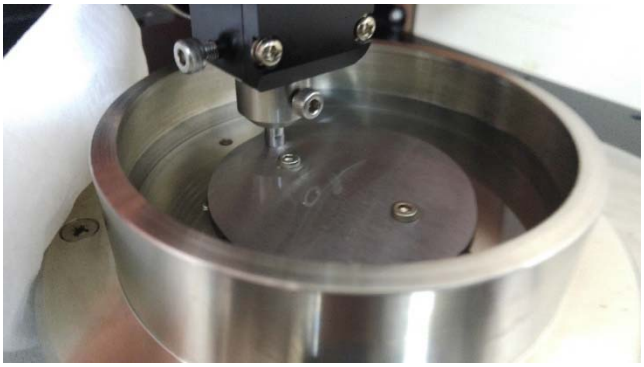


Fig. 4 Overview of pin on disk wear test in the substitute ocean water.

2.4 節で述べた手順と同様の手順で摩耗係数を計算し，その結果を Table 8 に示す．摩耗係数の算出にあたり使用したビッカース硬さは Table 3 の値を用いた．

Table 9 は大気中と人工海水中で測定された比摩耗量について，標本平均の標準誤差を比較した結果である．

人工海水中の比摩耗量は大気中と比較して小さな値が得られた. 水および食塩水中でスラストカラー形試験片を用いた摩耗試験を行った肥田の報告 [24] を参照すれば，人工海水中の実験において接触面近傍で生じた腐食生成物による潤滑作用が比摩耗量を軽減させた可能性が示唆される．また，標準誤差の比較から, 人工海水中における比摩耗量のバラツキは大気中における値より，かなり小さいと判断できる．

Table 6 Test conditions of test S1 (Material Grade R3, in the substitute ocean water).

Specimen ID	Sliding pattern	Weight (gf)	Rotational speed (rpm)	Test period (s)	Total sliding distance (mm)	Mass change ($x10^{-3}$ g)		Specific wear ($x10^{-7}$ mm^2/N)	
						Pin	Disk	Pin	Disk
S1-1	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	2.0	17.3	0.11	0.96
S1-2	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	2.7	9.4	0.15	0.52
S1-3	Rotation	2,000	50	7,200	980,176.9	1.4	7.4	0.093	0.49
S1-4	Rotation	2,000	30	14,400	1,176,212	5.4	14.7	0.30	0.82
S1-5	Rotation	2,000	60	3,600	1,176,212	0.5	5.7	0.028	0.32
S1-6	Rotation	2,000	30	4,800	1,176,212	-0.8	9.9	-0.044	0.55
S1-7	Rotation	2,000	90	14,400	1,176,212	4.3	10.9	0.24	0.60
S1-8	Rotation	1,000	60	4,800	1,176,212	2.0	3.4	0.22	0.38
S1-9	Rotation	1,000	60	7,200	1,176,212	2.4	5.6	0.27	0.62
S1-10	Rotation	500	60	7,200	1,176,212	1.7	17.6	0.38	3.9
S1-11	Rotation	500	60	7,200	1,176,212	-0.3	3.5	-0.066	0.78
S1-12	Rotation	500	60	7,200	1,176,212	1.9	6.8	0.42	1.5
S1-13	Rotation	2,000	90	12,480	1,176,212	1.7	10.7	0.094	0.59
S1-14	Rotation	1,000	60	7,200	1,176,212	3.7	5.3	0.41	0.59

Statistic values of specific wear ($x10^{-7}$ mm^2/N)			
	Pin	Disk	Total
Average	0.23	0.94	0.58
Maximum	0.42	3.9	3.9
Minimum	0.028	0.32	0.028
Standard deviation	0.13	0.99	0.78
Standard error of mean	0.039	0.28	0.16

Table 7 Test conditions of test S2 (Material grade R3S, in the substitute ocean water).

Specimen ID	Sliding pattern	Weight (gf)	Rotational speed (rpm)	Test period (s)	Total sliding distance (mm)	Mass change ($x10^{-3}$ g)		Specific wear ($x10^{-7}$ mm^2/N)	
						Pin	Disk	Pin	Disk
S2-1	Rotation	2,000	50	7,200	980,176.9	1.3	7.5	0.86	5.0
S2-2	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	4.5	11.6	2.5	6.4
S2-3	Rotation	2,000	30	14,400	1,176,212	-1.8	10.5	-1.0	5.8
S2-4	Rotation	2,000	30	14,400	1,176,212	1.8	7.1	1.0	3.9
S2-5	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	1.2	16.4	0.66	9.1
S2-6	Rotation	2,000	90	5,400	1,323,239	1.5	38.4	0.74	19
S2-7	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	0.9	3.7	0.50	2.0
S2-8	Rotation	2,000	90	5,400	1,323,239	-1.6	10.4	-0.79	6.8
S2-9	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	-1.8	3.6	-1.0	2.0
S2-10	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	-1.8	18.7	-1.0	10

Statistic values of specific wear (x10^{-7}mm^2/N)			
	Pin	Disk	Total
Average	0.11	0.79	0.45
Maximum	0.25	2.1	2.1
Minimum	0.050	0.20	0.050
Standard deviation	0.072	0.69	0.59
Standard error of mean	0.029	0.28	0.17

Table 8 Wear coefficient of each material in the substitute ocean water condition.

Material grade		Specific wear (x10^{-7} mm^2/N)	Wear coefficient (x10^{-4})
R3	Ave.	0.58	1.5
	Max.	3.9	10
	Min.	0.028	0.071
	S.D.	0.78	2.0
R3S	Ave.	0.45	1.3
	Max.	2.1	6.1
	Min.	0.050	0.14
	S.D.	0.59	1.7

Table 9 Comparison of standard error of mean.

Material grade	Specific wear (x10^{-7} mm^2/N)	
	Atmosphere	Substitute ocean water
R3	1.1	0.16
R3S	2.1	0.17

Jayashinghe ら [13]は，係留鎖の摩耗に関する研究の現状を取りまとめた報告の中で，Rabinowicz[26]が実測した金属材料の摩耗係数に基づき，大気中及び海水中の摩擦面間の潤滑状況を考慮した摩耗係数の範囲を示している．この結果と本研究による摩耗係数の比較を Fig. 5 に示す．

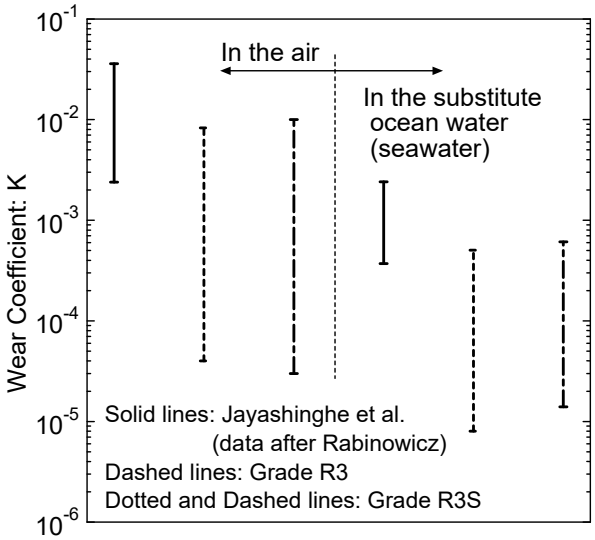


Fig. 5 Comparison of the wear coefficient.

同図中の実線が文献 [13]に示された摩耗係数の範囲，破線及び一点鎖線が本研究による実測値である．Rabinowicz の論文に示された摩耗係数の定義は，摩耗現象のモデル化の違いから，式（2）の摩耗係数の 1/3 の値であるため，Fig.5 の図示に際しては 3 倍して示した．Rabinowicz らの論文では，摩耗係数を計算するために必要な p_m 値の取り扱い方法（降伏応力を採用したのか，硬さを採用したのか，等）が不明である．また，p_m の値も示されていない．加えて，素材の組成や製造法等も Rabinowicz の研究当時から改善されている状況を考慮すれば，本研究で測定した摩耗係数と単純に比較することは適切ではないが，摩耗係数の数値のオーダは大きく変化しないと考えられるため，比較データとして採用した．Fig. 5 に示す比較結果と摩耗係数の値にバラツキが多いという知見を勘案すれば，本研究で導出した摩耗係数は妥当な数値であると見なせると考えられる．

3. 2　蒸留水中での摩耗試験

水および食塩水においてスラストカラー形試験片を用いた場合の摩耗試験を行った肥田の報告 [24] では，食塩水中の摩耗量は初期摩耗時における接触面への食塩による腐食生成物による潤滑作用の結果，蒸留水中での摩耗量より小さくなると報告されている．そこで，腐食生成物が摩耗試験結果に及ぼす影響を調査するため，蒸留水中で摩耗試験を行い，人工海水環境下での試験と比較した．

試験条件および試験結果を Table 10 に示す．比摩耗量を比較すると，実験数が少ないためバラツキが大きいものの，人工海水と蒸留水で優位な差があるとは判断できず，本試験結果から腐食生成物が摩耗挙動に及ぼす影響について結論付けることはできない．

4.　結　　論

本研究では，洋上浮体係留時の係留鎖で生じる摩耗挙動について数値解析により定量的に推定するために必要不可欠な情報である係留鎖の比摩耗量について，大気中及び人工海水中においてピン・オン・ディスク摩耗試験により測定した．得られた結果を以下に示す．

1) 大気中での係留鎖摩耗挙動を有限要素解析において推定するために必要な比摩耗量を得た.
2) 人工海水中では, 大気環境下と比較すると比摩耗量のバラツキは小さく，値も 1/10 程度に減少する.
3) 蒸留水中と人工海水中における試験を比較したが, 有意な相違は確認できなかった.

本研究で取得した比摩耗量については, 特に人工海水中での値は標本数が少ないため, 継続してデータの取得が必要であろう. また，一回の試験時間を延長するなどの工夫により生じる摩耗粉を増やすことで, 摩耗粉重量の測定値のバラツキを一層抑える等の測定値に対するバラツキへの対策も必要であろう.

将来課題として，本研究で取得した比摩耗量を用いて，緒言で述べた, 著者らが別途報告している数値解析手法による摩耗量推定を行い, 推定方法の妥当性検証並びに必要に応じた改善が挙げられる.

謝　辞

本研究は, 環境省 CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業「浮体式洋上風力発電施設における係留コストの低減に関する開発・実証」（平成 27～29 年度）の一部として実施したものである. 関係各位に厚く御礼申し上げます. また, ビッカース硬度測定に協力いただいた九州大学大学院修士課程 1 年の上田哲也氏に御礼申し上げます.

Table 10 Test conditions of test D1 (Material grade R3, in the distilled water).

Specimen ID	Sliding pattern	Weight (gf)	Rotational speed (rpm)	Test period (s)	Total sliding distance (mm)	Mass change ($x10^{-3}$ g)		Specific wear ($x10^{-7}$ mm^2/N)	
						Pin	Disk	Pin	Disk
D-1	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	1.4	7.4	0.077	0.41
D-2	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	0.6	-3.7	0.033	-0.20
D-3	Rotation	2,000	60	7,200	1,176,212	0.5	16.1	0.028	0.89

Statistic values of specific wear ($x10^{-7}$ mm^2/N)			
	Pin	Disk	Total
Average	0.046	0.65	0.29
Maximum	0.077	0.89	0.89
Minimum	0.028	0.41	0.028
Standard deviation	0.027	0.34	0.37
Standard error of mean	0.016	0.24	0.17

参 考 文 献

1) 宇都宮智昭 他：浮体式洋上風力発電施設における係留コストの低減に関する開発・実証について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 21 号, pp.265-266，論文番号 2015A-GS3-4, 2015.
2) 例えば，Gordon, R.B., Brown, M.G. and Allen, E.M.：Mooring Integrity Management, Proceedings of OTC, OTC-25134-MS, 2014.
3) Rampi, L., Dewi, F., Francois, M., Gerthoffert, A. and Vargas, P.: Chain Out of Plane Bending (OPB) Fatigue Joint Industry Project (JIP) Static Test Program and OPB Interlink Stiffness, Proceedings of OMAE 2016, OMAE2016-54195, 2016.
4) Rampi, L., Bignonet, A., Le Cunff, C., Bourgin, F. and Vargas, P.: Chain Out of Plane Bending (OPB) Fatigue Joint Industry Project (JIP) FEA Results and Multiaxiality Study Results, Proceedings of OMAE 2016, OMAE2016-54198, 2016.
5) Rampi, L., Gerthoffert, A., Francois, M., Bignonnet, A. and Vargas, P.: Chain Out of Plane Bending (OPB) Fatigue Joint Industry Project (JIP) Fatigue Test Program Results and Methodology, Proceedings of OMAE 2016, OMAE2016-54199, 2016.
6) Yaghin, A.L. and Melchers, R.E.: Long-term inter-link wear of model mooring chains, Marine Structures, Vol.44, pp.61-84, 2015.
7) 麻生裕司，橋本慎太郎：ブイ係留チェーンの挙動と摩耗特性，日本船舶海洋工学会誌, Vol.62, pp.11-14, 2015.
8) Gotoh, K., Murakami, K., Nakagawa, M. and Utsunomiya, T.: A Study on the Wear Performance of the Mooring Chain for Floating Wind Turbine, Proceedings of 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2017), OMAE2017-62195, 2017.
9) Gotoh, K., Nakagawa, M., Murakami, K. and Utsunomiya,

T.: Effect of Tensile Force for Wear Performance of Mooring Chain, Proceedings of 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2018), OMAE2018-77960, 2018.

10) Takeuchi, T., Utsunomiya, T., Toh, K. and Gotoh, K.: Development of Wear Estimation Method for Mooring Chain of Floating Structures, Proceedings of 31st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2018), pp.188-195, 2017.
11) https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/, (accessed on 7th May 2018).
12) 例えば，日本機械学会 : JSME S 013-2010 摩耗の標準試験方法（改訂版），pp.17-20，2010.
13) Jayasinghe, K., Potts, A., Kilner, A. and Melchers, R.: Mooring Chain Wear Experiments and Findings, Proceedings of OTC, OTC-28737-MS, 2018.
14) http://www.rhesca.co.jp/lineup/fpr/index.html, (accessed on 7th May 2018).
15) 山根和樹 : ピン・オン・ディスク摩耗試験による係留チェーンの比摩耗量に関する検討，平成 29 年度九州大学学士論文，九州大学工学部地球環境工学科，2017.
16) American Bureau of Shipping: Guide for Certification of Offshore Mooring Chain, 1999.
17) https://unit.aist.go.jp/am-ri/ja/teams/trib/equip00a.html, (accessed on 7th May 2018).
18) 笹田直 : 摩耗，養賢堂，2008.
19) 栗田洋敬，山縣裕 : AC9B および AC8A アルミニウム合金のフレッチング摩耗特性に及ぼす硬さの影響，日本金属学会誌，Vol.62，No.1，1998，pp.50-55.
20) 水本宗男，宇佐美賢一 : 摩耗はなぜ起こるのか，ターボ機械，Vol.24，No.5，1996，pp.267-273.
21) JIS Z 2244:2009，ビッカース硬さ－試験方法.
22) 水谷嘉之，矢作嘉章 : 腐食摩耗の基礎特性と機構，トライボロジスト, 第 34 巻, 第 5 号, 1989, pp310~313.
23) 岡部平八郎 : 腐食性環境における摩耗，潤滑，第 18 巻，第 4 号，1973，pp335-336.
24) 肥田昭 : 腐食摩耗について，潤滑，第 30 巻，第 7 号，1985，pp467-471.
25) ASTM D1141-98(2013): Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water, 2013.
26) Rabinowicz, E.: The Wear Coefficient – Magnitude, Scatter, Uses, Journal of Lubrication Technology, Transaction of ASME, Vol.103, 1981, pp.188-194.