

重防蝕鋼管の海水による摩耗に関する実験的研究

新日本製鉄㈱	正会員	佐藤 光一
北海道大学工学部	学生員	佐々木 広輝
北海道大学工学部		小山 浩明
北海道大学工学部	正会員	山下 俊彦
北海道大学工学部	正会員	佐伯 浩

1. はじめに

結氷する水域に建設される鋼構造物については、防蝕方法、氷の移動に伴う鋼材及びコーティング材の摩耗対策、それに氷盤との凍着強度の低下に充分注意を払わねばならない。氷海域に建設される鋼材を用いた海洋、海岸構造物は塗装により鋼材の腐蝕を防止しているが、この塗装も氷盤の移動による摩耗のため、塗膜厚が減り、ついには防蝕の効果がなくなる。佐伯等の研究によると、海洋構造物によく用いられる ZEBRON の海水による摩耗量は次式で示される。

$$S = 0.01 \times L \quad (1)$$

S : 平均摩耗量 (mm), L : 摩耗距離 (km)

この式は、相対速度が $V = 5.0 \text{ cm/sec.}$ 、鉛直応力が $\sigma_v = 10 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の摩耗量式であるが、仮に ZEBRON の塗膜厚を 1 mm とすると、氷盤の移動量 100 km で鋼材が露出する事になる。氷海域は一般に辺境の地にあるため高度の防蝕対策はとりにくく、またメンテナンスを要しない防蝕対策が必要である。そのような目的を持って開発されたのが重防蝕鋼材と呼ばれる高分子材料で被覆した鋼材である。本研究は海水による重防蝕鋼材の摩耗に関する系統的な実験結果をまとめたものである。

2. 実験方法及び実験材料

重防蝕鋼材の高分子被膜材の摩耗試験は、海水によるコンクリートの摩耗を調べるために開発した、往復運動方式の摩耗試験機を用いた。摩耗試験機と試験状況を図 1, 2 に示す。実験に用いた材料は、低密度ポリエチレン (LDPE)、高密度ポリエチレン (HDPE)、ウレタンエラストマー (硬度 62)、軟質ウレタンエラストマー (硬度 34)、ポリエステル、それにレジンモルタル、通常のコンクリート、無処理の鋼である。また実験条件としては、水温 (T) は $-5, -10, -20^\circ\text{C}$ とし、相対速度 (V) は 1, 5, 20 cm/sec とし、鉛直応力 (σ_v) は 10, 20, 30 kgf/cm² とした。海水の氷厚方向の氷温分布は、氷盤の底は海水の結氷温度である $-1.7 \sim -1.8^\circ\text{C}$ であり、表面は気温に近い氷温を示すが、気温の影響を受ける範囲は氷盤の上層のみである。その事を考慮して氷温を $-5^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ とした。また、相対速度については、オホーツク海の氷盤の移動速度は、海岸地形、水深、風速、潮流等の影響を受けるが最大で 2 ノット程度である。摩耗に直接影響を与えるのは、材料表面に働く摩擦力であるが、これは鉛直応力と海水と材料間の摩擦係数によって決まる。摩擦係数は、動摩擦係数、静止摩擦係数ともに相対速度の影響を受けるが、佐伯等の結果によると滑らかな鋼材では $V < 2 \text{ cm/sec.}$ で粗いコンクリートでは $V < 10 \text{ cm/sec.}$ で、V が小さくなるにつれて摩擦係数が急激に大きくなる。よって本実験においても、比較的遅い相対速度で実験を行った。また、鉛直応力の決定に当っては、実海域の構造物における、海水移動に伴う構造物表面に作用する摩擦力に合せる必要があるが、摩耗試験機の特長より、海水供試体に繰返し応力が加わる事から、海水が疲労破壊するため、30 kgf/cm² を最大とした。なお実験に用いた海水の大部分は塩分調製を行った人工海水であり -5°C での条件での一部はサロマ湖の海水を用いた。摩耗量の測定は図 3. に示すように、供試体に 5 本の測線を選び摩耗距離 L が 0 km の断面を基準にして、ある摩耗距離進んだ段階で、再度表面粗さ計で 5 測線の断面を計測し、 $L = 0 \text{ km}$ との差をとり、それを平均した量を平均摩耗量としている。図 3. は LDPE に対する $T = -20^\circ\text{C}$ 、 $\sigma_v = 10 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $V = 5 \text{ cm/sec}$ の条件での $L = 0 \text{ km}$ と $L = 10 \text{ km}$ の 5 測線の profile である。

3. 実験結果と考察

1) 摩耗距離と平均摩耗量 $\bar{S}$ の関係

低密度ポリエチレン (LDPE) に対する $T = -20^{\circ}\text{C}$ 、 $\sigma_v = 10 \text{ kg f/cm}^2$ 、 $V = 5 \text{ cm/sec}$ 条件下での平均摩耗量と摩耗距離の関係を示したものが図4. である。最初の 100 m 程度以下で摩耗が急に進むが、これは初期の材料表面の凹凸が削られるものと考えられる。その後は摩耗距離 L が増加するにつれて、平均摩耗量は直線的に増加する。また、この時の LDPE の摩耗量は摩耗距離 1 km 当り 0.0029 mm である。この平均摩耗量と摩耗距離の関係を他の材料と比較した結果が図5. である。コンクリートの場合は、大きく三つの段階に分ける事が出来る。第一段階は、平均摩耗量が 0.27 mm 以下の範囲で、次が $0.27 \text{ mm} < \bar{S} < 0.6 \text{ mm}$ の範囲そして $\bar{S} > 0.6 \text{ mm}$ の第三段階である。これはコンクリートが混合材料であり、かつ表面粗度が大きいため、第一段階が表面の凹凸とセメントペースト部分が削られ、第二段階で細骨材が露出し、第三段階で粗骨材が露出してくるためである。これに対して均質な材料である ZEBRON や LDPE は、平均摩耗量と摩耗距離の関係は二つの段階に分けられ、初期の第一段階は表面の凹凸部分が削られた後は、摩耗距離の増加とともに直線的に摩耗していくと考えられる。また図5. から明らかなように高分子材料である LDPE は表面粗度が小さいため、第一段階の範囲も他材料に較べて非常に狭く、また、最終段階の単位摩耗距離当りの摩耗量が非常に少なく、海水に対する耐摩耗性が非常に高い事を示している。

2) 相対速度と平均摩耗量の関係

材料の摩耗に影響を与える摩擦力は摩擦係数と鉛直応力によって決定される。また海水と諸材料間の摩擦係数は、水温、材料表面の粗さ、それに相対速度に依存する事が佐伯等の研究で知られている。図6. に、摩擦係数 μ と相対速度 V の関係を示す。表面粗度の大きいコンクリートと、滑らかな INERTER 160 を塗装した鋼の場合であるが、動摩擦係数、静止摩擦係数 μ_0 とともに、 $V > 20 \text{ cm/sec}$ の範囲では、摩擦係数は相対速度に依存しないで一定値を示すが、 $V < 20 \text{ cm/sec}$ の範囲では、相対速度が遅いほど摩擦係数は大きくなる。LDPE に対する平均摩耗量 $\bar{S}$ と相対速度 V の関係を調べたものが図7. である。摩耗距離 1 km での比較であるが、相対速度が 1 cm/sec の時が摩耗量が最も多く、図6. に示されている摩擦係数の結果に似た傾向を示している。

3) 水温 T と平均摩耗量 $\bar{S}$ の関係

海水と諸材料間の摩擦係数に影響を与える摩擦係数は、海水の強度に影響を与える水温に僅かながら影響を受ける。また、材料の摩耗に影響を与えられと考えられる海水のせん断強度は、佐伯等の結果によると、水温が -8°C 以下になると、一定のせん断強度を示し、水温への依存性が非常に弱くなる。図8. に LDPE とウレタンエラストマー (硬度62) の平均摩耗量と水温の関係を示す。ウレタンエラストマーの方は、水温の低下とともに若干摩耗量が増加する傾向にあるが、LDPE は水温には依存しない傾向がみられた。

4) 材料表面の平均粗さ R_a と平均摩耗量の関係

海水と諸材料間の摩擦係数については、材料表面の粗度が強く影響する事が知られている。この平均表面粗さ R_a と平均摩耗量の関係を調べた結果が図9. である。図からも明らかなように平均表面粗さ R_a が大きくなるにつれて、平均摩耗量が大きくなる結果が得られた。図中でポリエステルについては、表面粗度計で R_a を計測すると R_a が 0.5μ 程度であるが、これは表面粗度計が非常に短い距離の粗さを測定しているためで、 8 cm 程度の表面の凹凸を測定すると、表面の大きな凹凸が計測され、 R_a が 18μ 程度となる。また、LDPE に人工的に引っかききずをつけたものは、 R_a が 6.5μ 程度であったが、それを表面粗度計で測定すると図10. のようになり、削られた部分が摩擦係数等にほとんど影響しない profile となっているため、きずをつけない時の R_a の値で整理すると実験直線に近づくことになる。以上、材料の表面粗さが平均摩耗量に影響を与える事は明確になったが、今後は材料表面粗さの定義を明確にしていく必要があると考えられる。

5) 材料の硬度と平均摩耗量の関係

材料が硬ければ摩耗しにくいと考えられる。本研究ではショアD硬度と摩耗量の関係を調べたが、図11. に示すように、平均摩耗量はショアD硬度にはほとんど関係ない事が明らかとなった。ショアD硬度は材料の反発から求められるのであるが、摩耗等の現象に対しては、引っかき型のマルテンス硬度やピアバウム硬さを用いる方がより適当と考えられる。なお図中のショアD硬度が85の値は平均摩耗量が非常に大きい、これはポリエ

ステル及びレジンモルタルである。これらは表面粗さも他の材料に較べてはるかに大きい事と、ポリエステルについては硬くてもろいため、海水による繰り返し摩擦力で表面が剥離するためである。

6) 平均摩耗量に及ぼす鉛直応力の効果

同一の摩擦係数であれば、鉛直応力が増加すると摩擦力は増大する事になり摩耗量が増大する事が考えられる。図12. に LDPE に対する平均摩耗量と鉛直応力の関係を示す。鉛直応力が 10 kg/cm^2 を越えると平均摩耗量が急に増大するが、これは海水によるコンクリートの摩耗についても同様な結果を示す。実際の氷海域に建設される鋼構造物の重防蝕材の厚さの決定に当っては、構造物に作用する氷圧力分布あるいは構造物の接線方向の氷力分布が早急に明らかにされねばならない。

7) 各高分子材料の海水による平均摩耗量

本実験で取り扱った8種類の材料の平均摩耗量と摩耗距離の関係を図13. に示す。各材料とも最初急激に摩耗が進むが 1 km を過ぎると摩耗量は非常に小さくなる。高分子材料は均質であるので、図3. にも示したように $L > 1 \text{ km}$ では、平均摩耗量は摩耗距離と直線の関係を示すので、 $1.0 \text{ km} \leq L \leq 2.0 \text{ km}$ の範囲で摩耗距離 1 km 当りの平均の摩耗量を求めると、 $T = -20^\circ\text{C}$ 、 $\sigma_v = 10 \text{ kg/cm}^2$ 、 $V = 5.0 \text{ cm/sec}$ の条件下では、LDPE が 0.00029 mm/km 、HDPE が 0.0045 mm/km 、ウレタンエラストマー (D62) が 0.0028 mm/km 、ウレタンエラストマー (D34) が 0.0045 mm/km 、ポリエステル及びレジンモルタルが 0.0169 mm/km 、鋼が HDPE 等と同じく 0.0045 mm/km 、一軸圧縮強度が 350 kg/cm^2 のコンクリートが 0.0499 mm/km となる。以上の材料別の比較から、LDPEとウレタンエラストマー (D62) が海水に対して耐摩耗性にすぐれていて、HDPE・ウレタンエラストマー (D34)・鋼が前者の約6割大きい摩耗量を示し、コンクリートは LDPE の約20倍の摩耗量を示す事が明らかとなった。

参考文献

- 1) 佐伯浩, 浅井有一郎, 泉洸, 竹内貴弘: 海水によるコンクリートの摩耗に関する研究, 第10回海洋開発シンポジウム, p.68-73, 1985
- 2) 浅井有一郎, 今野潔, 梶谷哲彦, 竹内貴弘, 佐伯浩: 海水による各種コンクリートの摩耗に関する研究, 第11回海洋開発シンポジウム, p.85-89, 1986
- 3) H.Saeki, T.Ono, N.Nakazawa, M.Sakai and S.Tanaka : The Coefficient of Friction between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structure, Proc.of Offshore Technology Conference, Vol.1, p.375 - 382, 1984
- 4) H.Saeki, T.Ono, N.Nakazawa, M.Sakai and T.Tanaka : The Coefficient of Friction between Sea Ice and Various Materials Used in Offshore Structures, Jour.of Energy Resources Technology, Trans.of ASME, Vol. 108, p.65 - 71, 1986
- 5) H.Saeki, T.Ono, N.E.Zong and N. Nakazawa: Experimental Study on Direct Shear Strength of Sea Ice, Annals of Glaciology, I.G.S., 6, p.218-221, 1985

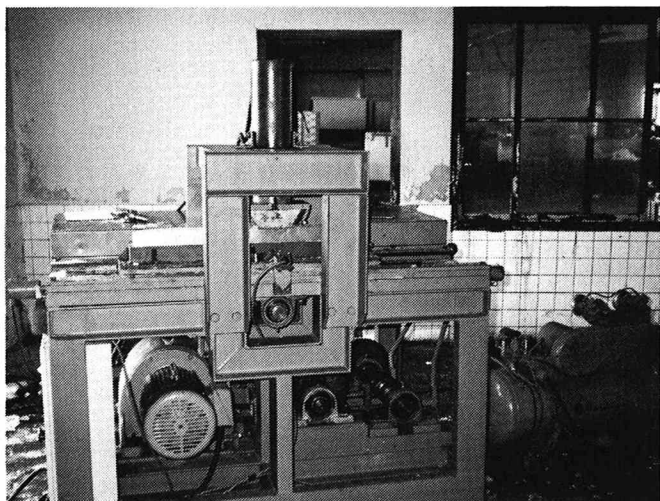


図1 海水用

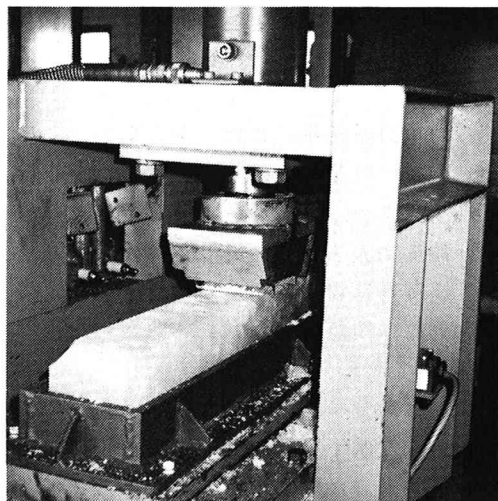


図2 海水供試体

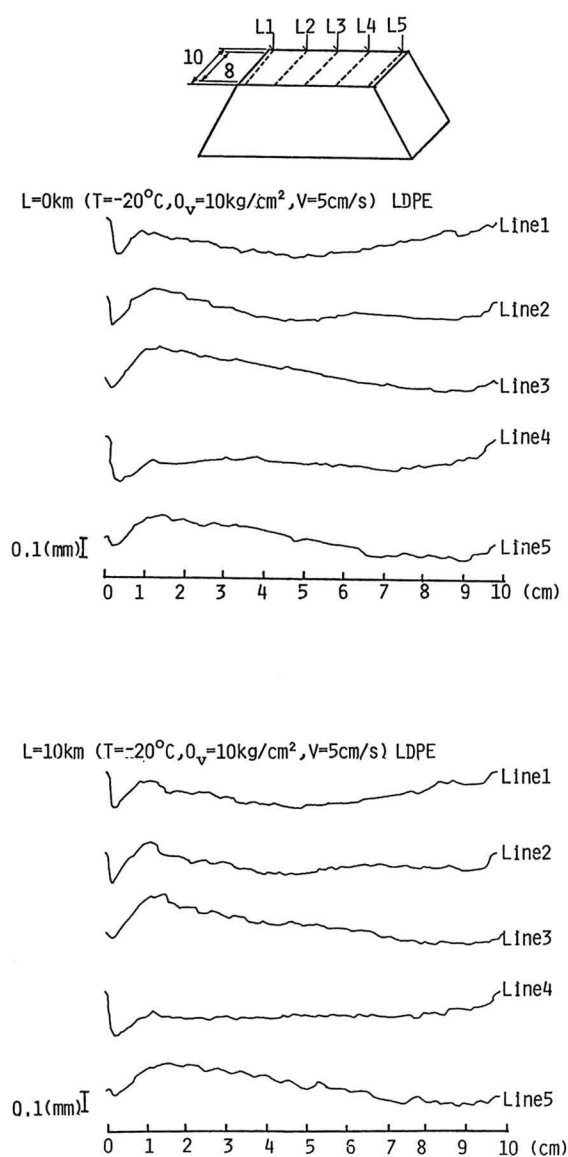


図3 海水によるLDPE表面の摩耗

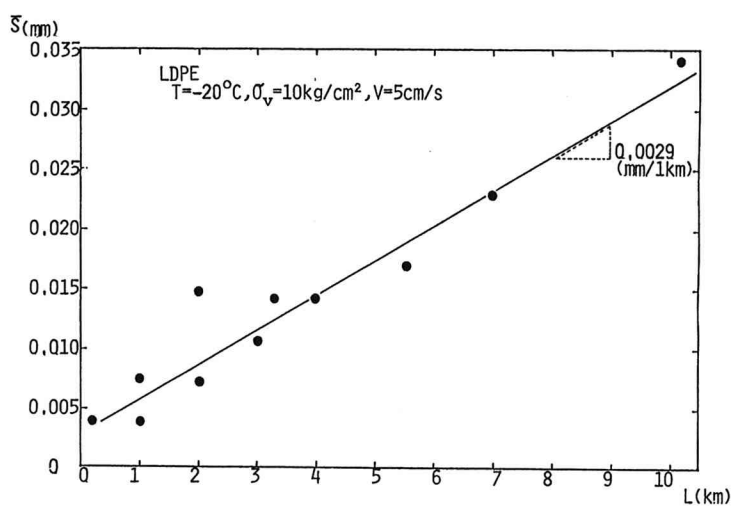


図4 LDPEに対する摩耗距離と摩耗量の関係

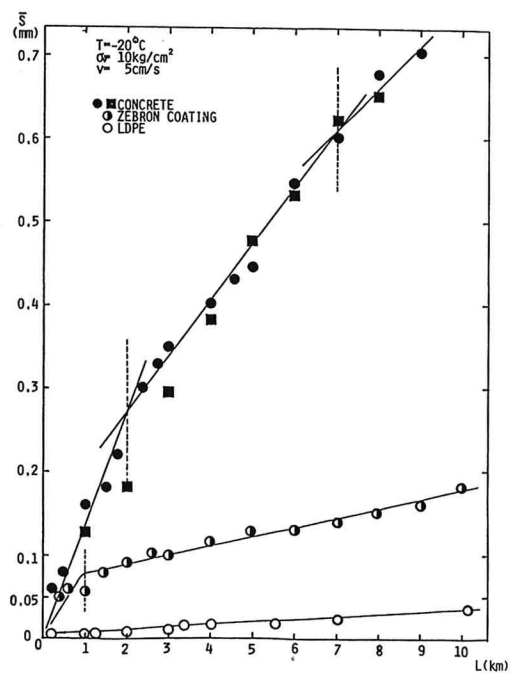


図5 摩耗距離と平均摩耗量の関係

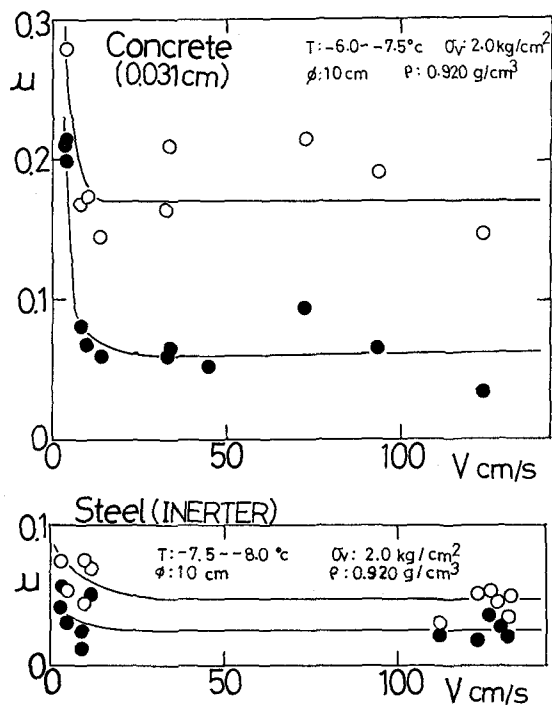


図6 相対速度と摩擦係数の関係

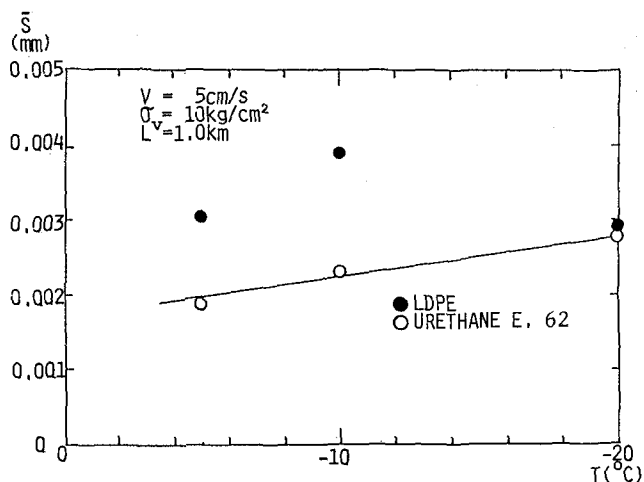


図8 水温と平均摩耗量の関係



図10 人工きずの形状

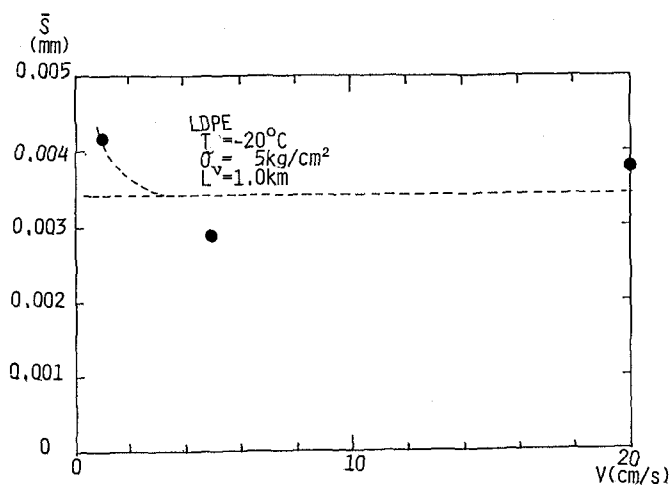


図7 相対速度と平均摩耗量の関係

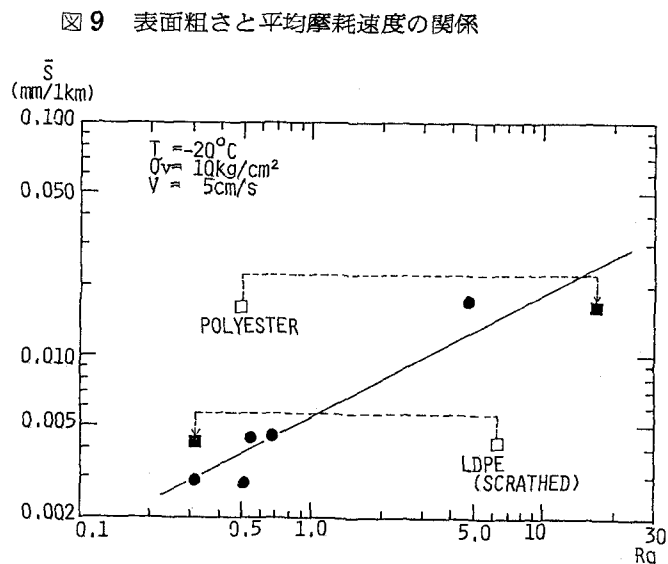
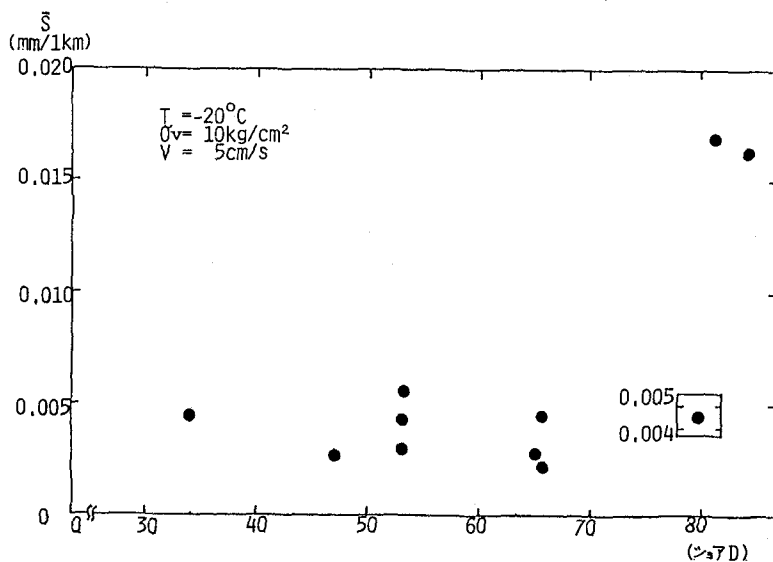


図11 ツョアド硬度と平均摩耗速度の関係



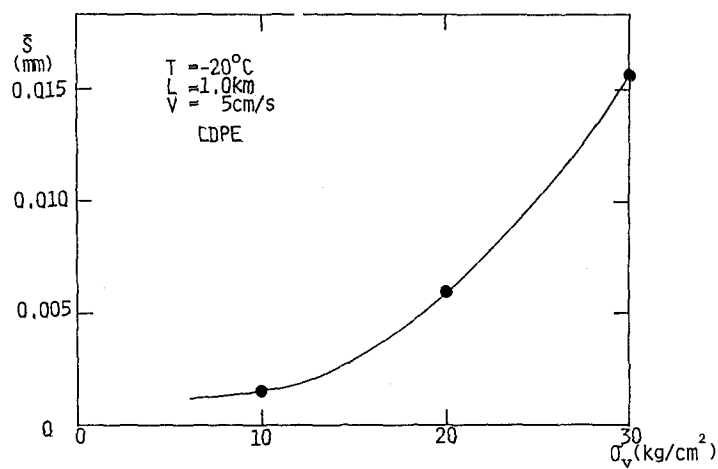


図 1 2 鉛直 応力と平均摩耗量の関係

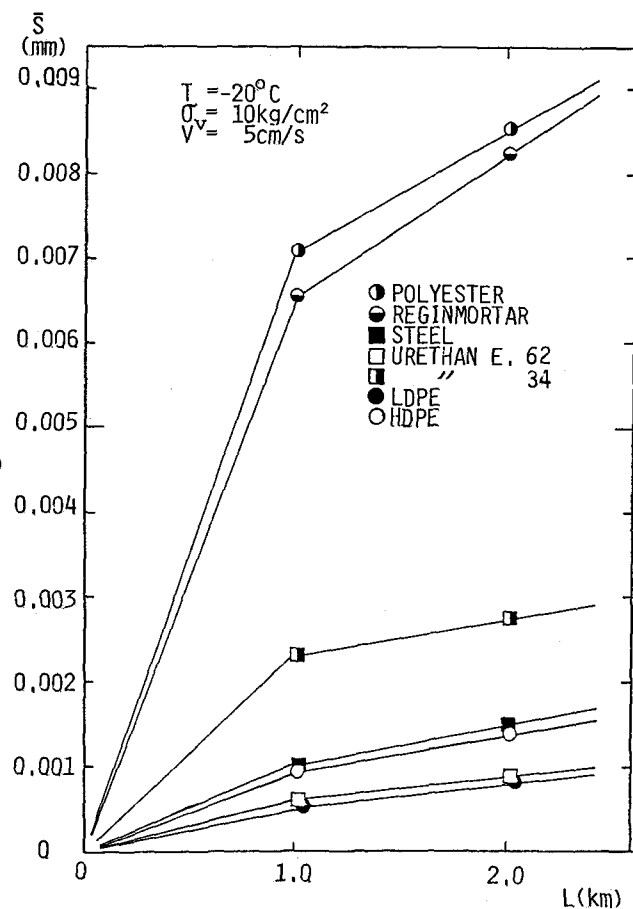


図 1 3 各材料に対する摩耗距離と平均摩耗量の関係