

# 静止附近における転り摩擦に関する実験的研究

宮 入 武 夫\*

(信州大学工学部機械科教室)

## 1 緒 言

摩擦に関する研究は斯界の先覚者 Leonardo da Vinci 以来幾多の科学者に依つて不撓の努力が続けられ、現在も尙多くの研究者によつてその追求に暇のない状態である。この事実は摩擦の本質が汙りか、転りか、又その生ずる原因に対しても凹凸説、凝着説と各種各様の諸説が提唱され、摩擦現象に関する定説を打立てることが極めて至難であることを物語るものとする。茲に筆者は一実験法によつて、鋼球の転り運動中の摩擦特性を調べ、その現象と推理的判断によつて一考察を行つたので、その一端を発表する次第である。

## 2 転り摩擦機構と理論

従来転り摩擦機構としては所謂 Dubbel の説が一般に認められている。即ち第1図の如く回転体が等速運動を持続するためには  $F$  なる水平外力を作用させて回転モーメント  $M = F \cdot r$  を働かせる必要がある、これが回転体と底面との接触部に於ける弾性変形によつて荷重  $M \cdot g$  の反力  $P$  ( $M \cdot g$  に等しい) が進行方向に対し小距離  $\delta$  丈先行するために、これが  $Mr = \delta \cdot P$  の抵抗モーメントを生起して、上記のモーメント  $M$  と釣合うと云うのである。

$$\text{故に } M = Mr = \delta \cdot P \dots\dots(A)$$

ここで  $[\delta]$  は  $cm$  で表わされ、これを転り摩擦係数と称え、機械工学便覧にもこれを採用して居るが筆者は(B)式の如く考えた、即ち

$$Mr = k \cdot a \cdot P \dots\dots(B)$$

茲で  $k$  : 比例常数

$a$  : 接触半幅 (後出)

大体転り摩擦モーメントを汙り摩擦に於ける Coulomb の法則の如く汙り摩擦係数  $\mu$  に対して転り摩擦係数  $\delta$  で表示しようとする処に無理が存するのではないかと思われる。そこで筆者は転り摩擦機構を第2図のように回転体の運動方程式として、

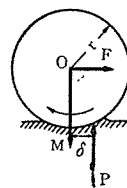
水平方向  $y$  に於ける運動は

$$M \cdot \ddot{y} = -H \dots\dots(a)$$

O点を通り I-I 軸に平行な軸周りの回転運動は (第5図参照)

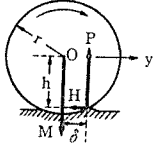
$$I_0 \cdot \ddot{\theta} = H \cdot h - P \cdot \delta \dots\dots(b)$$

第1図



\* 信州大学助教授

第2図



$$=H \cdot r - P \cdot \delta \dots\dots (c)$$

$$(\because h \neq r)$$

一方所謂転り摩擦モーメント  $M_r$  は回転体が底面 (V溝レール座) 上を運動する場合迄を無視し純転り運動を行うものと考えて瞬間中心軸 (I-I) 周りの回転運動として (Hによるモーメントを無視して)

$$M_r = I_I \cdot \ddot{\theta} (= \delta \cdot P) \dots\dots (d)'$$

で表わされる。

(d)'式は(a)及(c)式よりHを消去することによつても導かれる。

但 M : 回転体 (鋼球) の質量

H : 水平反力

$I_0$  : 回転体中心軸 O に関する質量慣性モーメント

$\ddot{\theta}$  : 回転体の角加速度

P : 垂直反力 (一般には  $M \cdot g$  に等しくない)

$\ddot{y}$  : 回転体の水平加速度

$I_I$  : 回転体と底面との接触点を結ぶ軸 I-I に関する慣性モーメント ( $I_I = I_0 + Ma^2$ , 第5図参照)

$M_r$  : 所謂転り摩擦モーメント

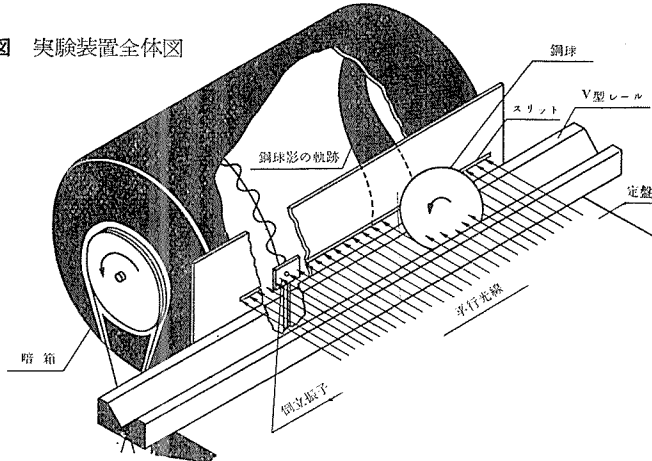
結局転り摩擦モーメントの値は従来の如く  $\delta$  で示すことは一般には不合理であるため筆者は直接転り摩擦モーメントの大きさを表わすことにした、

即ち(d)'式より  $M_r = I_I \cdot \ddot{\theta} \dots\dots (d)$

となり、 $\ddot{\theta}$  を球の回転運動に於ける Motion diagram (後述) より求めたのである。

### 3 実験装置並実験項目

第3図 実験装置全体図



\* この仮定は実験上鋼球表面上に線をマークし、これを観察することによつて妥当であることを認めた。

実験装置は第3図に示す如く二本のレールでV溝を作り(第4図の形状寸法のもので軟鋼焼入ショア硬度45.5,)これを水平に置き,その中で鋼球(球軸受ボール)を転がし,レール間との転り摩擦モーメントによる減衰回転運動をスリットを透して,回転するドラムに巻付けた暗箱中の印画紙に平行光線を投射して光学的に運動状態を在りの儘に捕えた,一方これと同時にドラムの回転を正確に規正するため倒立打子の振動曲線を同一の印画紙に刻んだ。この方法で軟鋼(乾燥)レールに就いて行つた

第4図

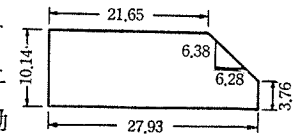
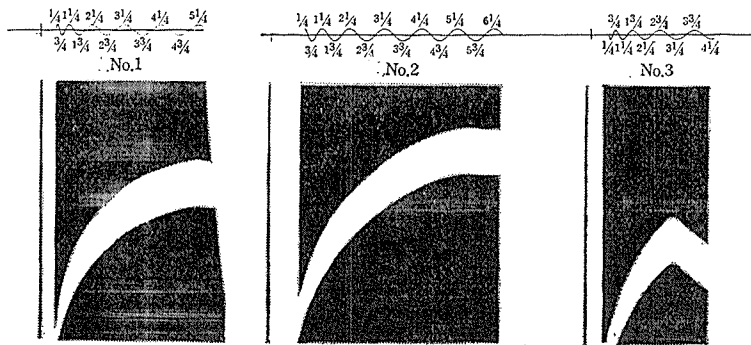


写真 1



同一実験例を写真1に示す。尙転り摩擦は在りのそれに比して桁違いに微量であるため現象が微妙であるから実験は注意して行つた。即ちレール面の水平度は感度 $0.01\text{mm/m}$ の精密水準器で調整した。面の清浄度は摩擦に敏感に影響するためガソリンで面を洗い,その後清潔なガーゼで拭い乾燥後実験を行つた。尙球に一定の初速を与えるため衝撃的の打出機を以て行つたが,一定の運動を与えることが殆んど出来なかつたため直接指先で行つた,又ドラムの回転は電蓄用の変速式モーターを用い駆動して極めて良好な結果を得た。

次に行つた実験項目は一個の球でレールの材質及油を変えて第1表の如き諸条件で行つた。

第 1 表 実験の 状態

材料(レール)	接触面の粗度 $\mu$	硬度(ショア)	油の種類	摘 要
軟鋼(焼入)	0.3	45.5	乾燥のみ	C400L 砥石で 手仕上げラップ
ゲージ用鋼	0.5	75.0	乾,水,時計油	ゲージ端面で ない
スリ硝子	4.4	115.0	乾,時計油, 機械油	
透明硝子	0	115.0	乾燥のみ	

\*  $45^\circ(=a)$  に作つたものであるが実際の仕上り寸法は図の如く多少異なつたが  $45^\circ$  と見做した。

## 実験題目 鋼 球 の 転 り

測定昭和28年

第 2 表

No	y m/m	x m/m	マ-ク x m/m	相对距離 マ-ク x-x m/m	振幅y 中心線(y <sub>0</sub> )	y~y <sub>0</sub> =Y
1	86.153	53.405	58.600	5.195	5.542 4.698	0.844
2	85.500	53.265	58.580	5.315	5.738 "	1.040
3	84.000	52.931	58.585	5.654	5.880 "	1.182
4	80.000	51.800	58.545	6.745	3.915 "	0.783
5	77.000	50.752	58.505	7.753	3.430 "	1.268
6	75.000	49.880	58.522	8.642	4.632 "	0.066
7	72.000	48.289	58.461	10.172	5.916 "	1.218
8	70.000	47.170	58.464	11.294	4.020 "	0.678
9	67.000	45.080	58.467	13.387	3.335 "	1.363
10	65.000	43.446	58.462	15.016	4.384 "	0.314
11	63.000	41.606	58.467	16.861	5.900 "	1.202
12	60.000	38.393	58.454	20.061	4.272 "	0.426
13	58.000	35.513	58.458	22.945	3.681 "	1.017
14	56.000	32.175	58.412	26.237	5.984 "	1.286
15	55.000	30.144	58.422	28.278	5.394 "	0.696
16	54.000	27.653	58.405	30.752	3.603 "	1.095
17	53.000	24.807	58.407	33.600	4.453 "	0.245
18	52.000	21.693	58.396	36.703	6.073 "	1.375
19	51.500	19.508	58.405	38.897	4.788 "	0.090
止20	51.123	16.789	58.421	41.632	3.544 "	1.154

## 摩 擦 測 定 No. 1

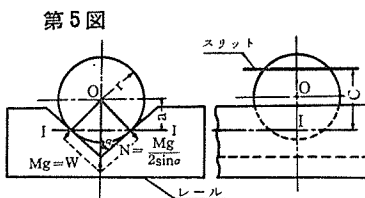
摘要 レール：軟鋼

9 月 28 日

振幅 $y_m$ 中心線( $y_0$ )	$y_m \sim y_0 = Y_m$	$Y/Y_m$	$\sin^{-1} Y/Y_m$	$\times 1/r =$ $\times 0.068542$	振幅 $y$ の 位置	山の時間	換算時間 $t$ (sec)
5.927							
4.698	1.229	0.687	0.757	0.052	$2/4$	0.215+	0.267
"	1.229	0.846	1.008	0.069	$2/4$	0.215+	0.284
"	1.229	0.962	1.294	0.089	$3/4$	0.430-	0.341
3.287							
"	1.411	0.555	0.588	0.040	1	0.430+	0.470
"	1.411	0.899	1.117	0.077	$1^{1/4}$	0.645-	0.568
5.941							
"	1.243	0.053	0.053	0.004	$1^{2/4}$	0.645+	0.649
"	1.243	0.980	1.370	0.094	$1^{3/4}$	0.860-	0.766
"	1.243	0.545	0.576	0.039	$1^{3/4}$	0.860-	0.821
3.323							
"	1.375	0.991	1.437	0.098	$2^{1/4}$	1.075-	0.977
"	1.375	0.228	0.230	0.016	$2^{1/4}$	1.075-	1.059
5.980							
"	1.282	0.938	1.217	0.083	$2^{2/4}$	1.075+	1.158
3.425							
"	1.273	0.335	0.342	0.023	3	1.290+	1.313
"	1.273	0.799	0.926	0.064	$3^{1/4}$	1.505-	1.441
6.038							
"	1.338	0.961	1.291	0.086	$3^{2/4}$	1.505+	1.591
"	1.338	0.520	0.547	0.037	$3^{3/4}$	1.720-	1.683
3.461							
"	1.273	0.885	1.086	0.074	4	1.720+	1.794
"	1.273	0.198	0.199	0.014	$4^{1/4}$	1.935-	1.921
6.088							
"	1.390	0.989	1.422	0.097	$4^{3/4}$	2.150-	2.053
3.515							
"	1.183	0.076	0.076	0.005	5	2.150+	2.155
"	1.183	0.975	1.347	0.092	$5^{1/4}$	2.365-	2.273

### 4 実験解析法

3節の写真1より変位  $y$  と時間  $t$  との関係 (Motion diagram) を求むる方法は筆者等が先に発表した軸受の動摩擦特性<sup>(3)</sup>に於けると同一要領で行つた。尙球とレールとの接触関係は第5図に示す如くである。上の変位  $y$  より回転運動は直ちに導かれる。即ち



$$\text{回転角: } \theta = \frac{y}{a}, \quad \text{角速度: } \dot{\theta} = \frac{\dot{y}}{a}, \quad \text{角加速度: } \ddot{\theta} = \frac{\ddot{y}}{a}$$

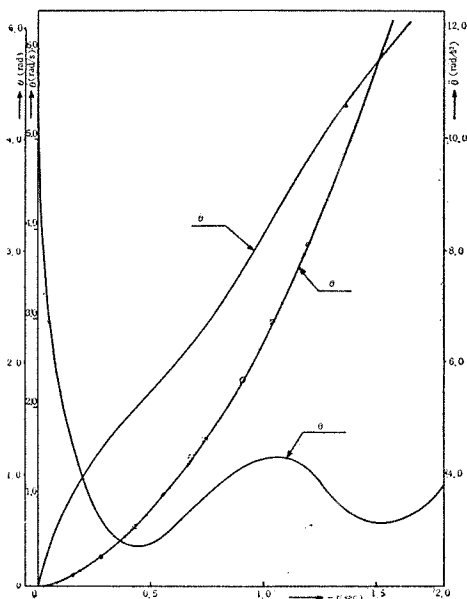
一方計算より  $I_1 = I_0 + M \cdot a^2$  が求まるから2節(d)式より転り摩擦モーメント  $Mr$  を算出することが出来る, 従つて運動中刻々に変る  $Mr$  の変化を連続的に見出し得る。尙ここで変動する摩擦モーメントの大小を比較検討するために運動中一定の摩擦と見做した等価転り摩擦モーメント  $Mre$  を次の運動エネルギー式より算定した。

$$E = Mre \cdot \theta = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} I_0 \dot{\theta}^2$$

$$\text{故に } Mre = \frac{1}{2\theta} (M \dot{y}_0^2 + I_0 \dot{\theta}^2) \dots\dots(e)$$

但  $\theta$  : 考えて居る角位置から静止する迄の回転角

第6図 軟鋼面座に於ける運動諸曲線 (乾燥面No.1)



$\dot{y}_0$  及  $\dot{\theta}$  : 考えて居る角位置に於ける線速度及角速度

である。尙以上各種実験に於ける必要諸元は次の如くである。即ち

- 鋼球の質量  $M = 8.7\text{gr}$
- // の半径  $r = 0.615\text{cm}$
- 鋼球の中心  $O$  から接触点迄の距離  $a = 0.431\text{cm}$
- $\sin \alpha = 0.7072$
- $I_0 = 1.315\text{gr} \cdot \text{cm}^2, I_1 = 2.93\text{gr} \cdot \text{cm}^2$
- 接触点に於ける法線力

$$N = \frac{M \cdot g}{2 \sin \alpha} = 6.15\text{gr}$$

倒立振子の周期  $T = 0.431\text{sec}$

又参考までに硝子の厚さ (透明スリ共に)

第 3 表

t (sec)	y (mm)	$\theta$ (rad)	$\dot{y}$ (mm/s)	$\dot{\theta}$ (rad/s)	$\ddot{y}$ (mm/s <sup>2</sup> )	$\ddot{\theta}$ (rad/s <sup>2</sup> )	$I_I \cdot \ddot{\theta}$ (dyne cm)
1.88	30.73	7.13	30.81	7.14	18.20	4.22	12.38
1.78	27.75	6.44	29.11	6.74	15.92	3.70	10.84
1.68	24.90	5.77	27.60	6.40	14.42	3.34	9.80
1.58	22.23	5.15	26.21	6.07	13.68	3.18	9.31
1.48	19.61	4.55	24.86	5.76	13.60	3.16	9.28
1.38	17.15	3.98	23.50	5.46	14.24	3.31	9.69
1.28	14.89	3.45	21.95	5.08	15.90	3.70	10.83
1.18	12.78	2.96	20.25	4.70	17.86	4.15	12.14
1.08	10.85	2.52	18.42	4.26	18.60	4.32	12.68
0.98	9.05	2.10	16.53	3.83	18.34	4.26	12.50
0.88	7.48	1.73	14.76	3.43	17.44	4.06	11.87
0.78	6.05	1.40	13.08	3.03	16.00	3.71	10.89
0.68	4.82	1.12	11.60	2.68	14.46	3.36	9.84
0.58	3.72	0.86	10.24	2.39	12.80	2.97	8.69
0.48	2.73	0.63	9.03	2.09	11.50	2.67	7.83
0.38	1.88	0.44	7.87	1.82	11.86	2.74	8.05
0.28	1.15	0.27	6.58	1.52	13.50	3.13	9.17
0.18	0.55	0.13	5.03	1.16	17.70	4.12	12.06
0.08	0.15	0.03	2.85	0.65	26.00	6.04	17.69
0	0	0	0	0	51.10	11.8	34.67

$t = 0.2\text{cm}$

接触点からスリット迄の距離  $C$  は

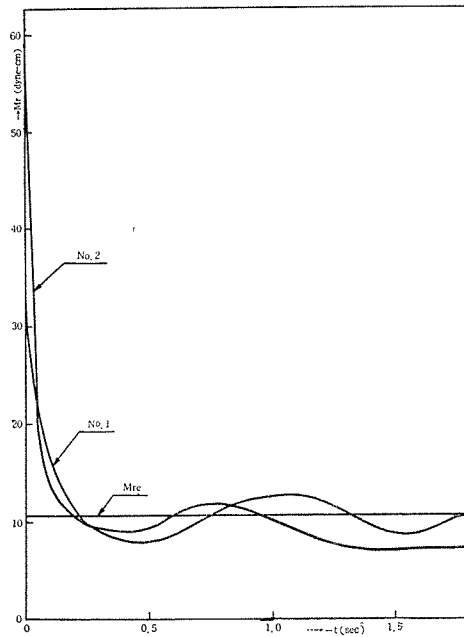
軟鋼:  $C = 0.643\text{cm}$ ,

硝子:  $C = 0.368\text{cm}$ ,

ゲージ鋼:  $C = 0.535\text{cm}$

次に軟鋼レール面上に於ける  $y$  及  $t$  を上記写真 1 の実験 No. 1 を座標読取器 (最小目盛  $1\mu$ ) より測定し算出手順の例を示すと第 2 表の如くなり, 第 2 列目の  $y$  と最後の列の換算時間  $t$  を座標として Motion diagram ( $y \sim t$ ) が画かれ, これを図式微分することによつて  $\dot{y} \sim t$  及  $\ddot{y} \sim t$  曲線が求まる, これ等運動諸曲線を第 6 図に示す。尚  $M_r$  の計算手順を第 3 表に掲げた。これ等  $M_r \sim t$ ,  $M_{re} \sim t$  曲線を纏めて第 7 図に示す。

第 7 図  $M_r \sim t$  曲線 (乾燥)  
軟鋼 (2 種)



### 5 実験結果

3 節の第 1 表に掲げた各種実験に就いて 4 節と同様の方法で解析した結果を第 8 図から第 14 図に示す。

尚 転り摩擦係数  $\delta$  の値を 2 節で述べた如く一定条件 (本実験の如く) の下に於ては (d) 式が成立すると考えられるので (d) 式から  $\delta$  を求めると

$$\delta = \frac{M_r}{P} = \frac{M_r}{Mg} = \frac{M_r}{8526} \text{ cm} \dots (f)$$

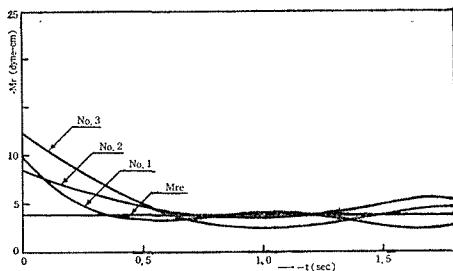
となり, これが弾性限内の圧に於ては接触半幅  $a$  より一般に小さいことが推定される。即ち

$$\delta < a \dots (g)$$

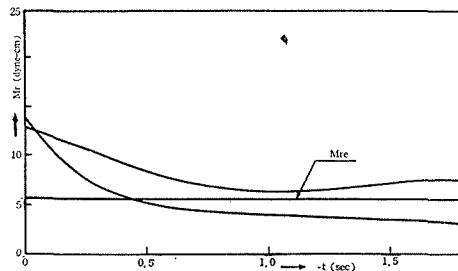
これ等を各実験に就いて静止点及次の最大点に関して求め, 理論値  $a$  とを第 4 表に表示した。これより静止点に於ける  $\delta$  はゲージ鋼を除いては全部 (g) 式を充さない, 次の最大点では殆んど充している。これに関しては次節で吟味する。尚各種レール面の粗度を表面検査器 (日本光学) で調べたものを写真 2 に示す, 尚前述の等価摩擦モーメントを算出し, それ等と粗度, 材質, (弾性, 硬度) 油等の影響を第 5 表及第 6 表に比較対照した。



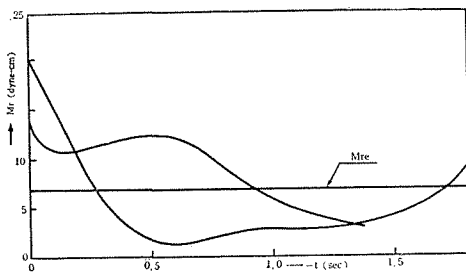
第8図 Mr~t曲線 (乾燥)  
ゲージ鋼 (三種)



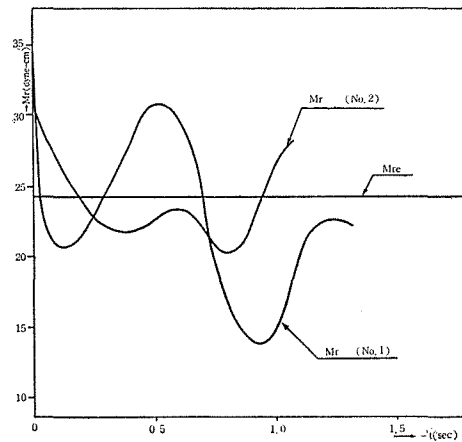
第9図 Mr~t曲線 (水)  
ゲージ鋼 (二種)



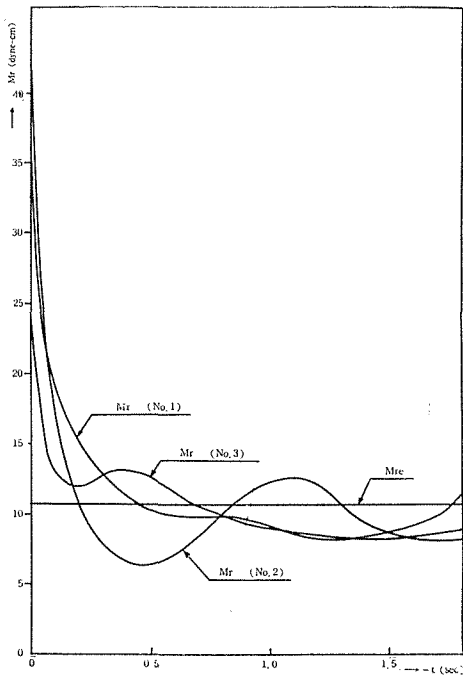
第10図 Mr~t曲線 (時計油)  
ゲージ鋼 (二種)



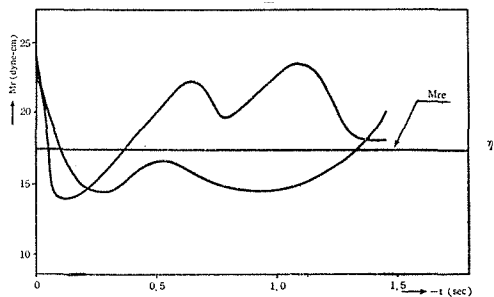
第12図 Mr~t曲線 (時計油)  
スリ硝子 (二種)



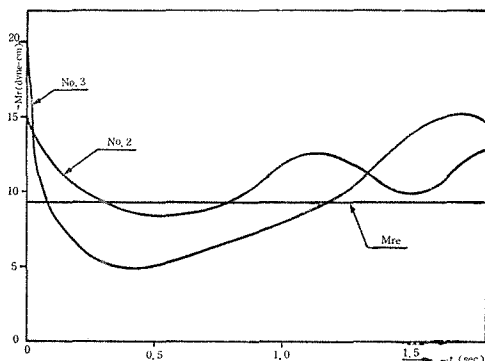
第11図 Mr~t曲線 (乾燥)  
スリ硝子 (三種)



第13図 Mr~t曲線 (機械油)  
スリ硝子 (二種)



第14図 Mr~t曲線 (乾燥) 透明硝子 (2種)



第 4 表 転り 摩 擦 係 数  $\delta$

図番	座の種類	ヤング率E (kg/cm <sup>2</sup> )	硬度H (ジョアー)	転り摩擦係数 $\delta$ ( $\mu$ )				理論的接触 半巾a( $\mu$ )	摘 要	
				静止点及 $\delta/a$	次の最大点及 $\delta/a$					
7	軟 鋼 (焼入)	No. 1	2.1×10 <sup>6</sup>	45.5	40.7	3.03	°12.7	°0.94	13.5	1. $\delta$ は凡て座が乾燥状態に於ける値 2. $\delta$ 欄中○印は $\delta < a$ の条件を充すもの
		No. 2	"	"	62.9	4.6	°13.4	°0.99		
8	ゲージ鋼	No. 1	"	75.0	°11.5	°0.85	°4.7	°0.35	13.5	3. a 欄中硝子の最大接触応力は塑性域であると考えられるのでa=17.2より大であろう。従つて△印の値も辛じて $\delta < a$ の条件を充すものと思われる。
		No. 2	"	"	°9.8	°0.73	°6.2	°0.46		
		No. 3	"	"	14.5	1.07	°4.4	°0.33		
11	スリ硝子	No. 1	0.67×10 <sup>6</sup>	115.0	47.6	2.76	°14.8	°0.86	17.2	
		No. 2	"	"	48.1	2.8	°13.7	°0.80		
		No. 3	"	"	27.9	1.62	°10.1	°0.59		
14	透明硝子	No. 2	"	"	17.9	1.04	°14.8	°0.86	17.2	
		No. 3	"	"	22.3	1.3	°17.7	°1.03		

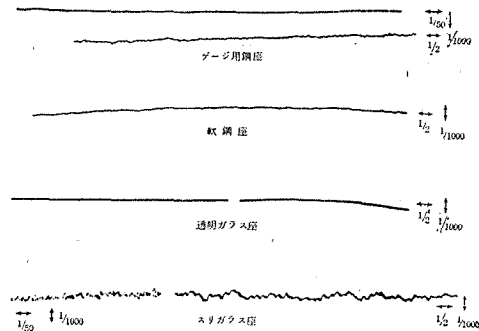
第 5 表 平均等価摩擦能(乾燥面)

図番	材料の種類	接触面の最大粗度 s ( $\mu$ )	接触圧による接近量 b ( $\mu$ )	硬度H (ジョアー)	平均等価摩擦能 Mre*(dyne cm)	摘 要
7	軟 鋼 (焼入)	0.3	3.8	45.5	10.54	*茲でMreは速度 $\dot{\gamma} = 17$ mm/sの同一条件のもとに於ける各実験の平均値を示す
8	ゲージ鋼	0.5	"	75.0	3.84	
11	スリ硝子	4.4	5.0	115	10.76	
14	透明硝子	0	"	"	9.28	

第 6 表 平均等価摩擦能 (潤滑面)

図番	材料の種類	接触面の最大粗度 $s$ ( $\mu$ )	接触圧による接近量 $b$ ( $\mu$ )	潤滑液	平均等価摩擦能 $Mre^*$ (dyne cm)	摘 要
9	ゲージ鋼	0.5	3.8	水	5.61	*Mreは第5表と同一
10		"	"	時計油	6.83	
12	スリ硝子	4.4	5.0	"	24.20	
13		"	"	機械油	17.43	

写 真 2



## 6 実験結果の検討

R. K Allan著“Rolling Bearings”によれば転り摩擦に影響する因子として次の10項目を取挙げている。

- 1) 材料の弾性的性質
- 2) 接触表面の仕上程度及粗度
- 3) 弾性ヒステリシス
- 4) 転り速度
- 5) 注油の状態
- 6) 底面の転り始めに於ける形状
- 7) 接触面に垂直な荷重の大きさ
- 8) 合成された切線力の方向と大きさ
- 9) 温度
- 10) 空気抵抗

この中本実験では第1項, 第2項が特に大きく効いているものと推定される。尙この摩擦は前述の如く高次の微量であり, 且以上の諸項目の中には, 互に関連しているものもあり, 同一実験条件を人意的に再現することの困難を識つたのであつて, 写真1の各変位曲線の不同はそれに基くものと筆者は考えている。

## i) レール面の粗度に就いて

次に底面の粗度に就いて調べて見ると、今Hertzの理論で球が底面に接触した場合は第15図の如く歪んで、接触半幅：a及接近量：bは次式で算出される。

鋼球と鋼の場合

$$a = 1.109 \sqrt[3]{\frac{P \cdot r}{E_s}} = 0.00135 \text{ cm}$$

$$b = 1.231 \sqrt[3]{\frac{P^2}{E_s^2} \frac{1}{r}} = 0.000379 \text{ cm}$$

鋼球と硝子の場合

$$a = \sqrt[3]{1.5 \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) \frac{P \cdot r}{E}} = 0.00172 \text{ cm}$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{9}{4} \frac{m^2 - 1}{m^2 E} \frac{P^2}{r}} = 0.000496 \text{ cm}$$

茲で P : 接触圧力 (kg)

r : 接触球の半径 (cm)

E : 接触二物体のヤング率 (kg/cm<sup>2</sup>),  $\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{E_s} + \frac{1}{E_g} \right)$

E, E<sub>g</sub> : 鋼及硝子のヤング率 2.1 × 10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup>, 0.67 × 10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup>

m : ポアソン数  $\frac{1}{m} = 0.3$  (鋼, 硝子共)

となる。この理論的接触深さ b と本実験の底面の粗度 (写真 2 及第 5 表) とを比較すると前者の方が大きい (ゲージ鋼を除いて) ので球がこれ等面上を転がる場合動的にも粗度 (凹凸) の影響は二次的であると考えて差支えがなからう、第 5 表はこの事実を裏書して居る。然し静止点に於ける瞬間値 (摩擦モーメント) は凹凸の状態がその値に微妙に効くことが想像されるが、この点に関しては次の (ii) で述べる。

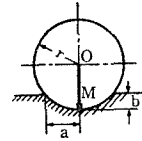
## ii) 転り摩擦係数 δ に就いて

平坦な完全弾性レール上を球が転がる理想的な場合は減速と共に弾性余効によつて摩擦モーメントは単調に増加し、静止点で最大値を示して、 $\delta < a$  の条件を充すことは想像に難くない。然し乍ら実際にはレールは材料的にも等質でなく且又凹凸が存在するため運動中動的な衝撃的反力を受けて摩擦モーメントは脈動する。而して球が摩擦の大なるレール上を転がる場合疾い速度で俄に減速、静止するため上記条件による現象が顕著に現われて、静止点では特に予期以上の衝撃的反力によつて大きな摩擦モーメントを発生して  $\delta >> a$  なる場合も当然起ることが推察される、事実実験上殆んど静止点で一旦止りから再び逆戻りすることが写真 1 の数例で明白に伺われる。この現象は摩擦の大なる面ほど極端に現われることも以上の考察によつて明かである。即ちかかる面ほど δ が a の圏外に出る可能性が多いと云うことも実験解析によつて確認された。茲で δ は勿論見掛上の説明であつて実際には過大なる反力 ( $P \gg M \cdot g$ ) が動的に生起するのである。

## iii) 弾性(回)及硬度(回)の影響に就いて

\* 平滑な面に於ては密着現象もそれに加担することは否めない。

第15図



実験種目の勘いたため定期的な事は述べ難いが一般的には、Eの大なる程及Hの小なる程Mrが小さいと云う極めて常識的な結果に到達した。而しこれ等が如何なる関係でMrに結びついて居るかは極めて面倒な問題である。即ち弾性と云つても弾性係数E丈で凡てを代表することが出来ないし、更に硬度Hに於ては弾性及塑性両域に亘る意味をもち、これが又材料によつて性格及作用が区々である。そこで同一材料に就いて考えると、先ず鋼類に於ては、

第5表のルールが軟鋼とゲージ鋼に就いては

$$Mr \propto \frac{1}{H^2} \quad (E \text{ は一定と考へ})$$

の関係式が成立する。然るにこのときの接触最大応力  $P_{max} = 1800 \text{ kg/cm}^2$  であつて弾性域であるため、従つて2節(B)式から、

$$Mr \propto a \cdot P$$

依つて一般に

$$Mr \propto \frac{1}{H^2} \sqrt[3]{\frac{P^4 \cdot r}{E_s}}$$

と考えられる。一方硝子の接触最大応力は  $P_{max} = 1000 \text{ kg/cm}^2$  で、これは塑性域<sup>\*</sup>にあるものと解される。又同表で明な如く硝子のMreが軟鋼のそれと略同一の値を示したことは硝子の塑性域に於ける特性が表われ、これが硬度と覗み合せて考えると、硝子のShore硬度には塑性域の特質が主として現われているものと思われる。一方塑性域にある以上Eの意味が失われて居ることは事実である。何れにせよ硝子は弾性限応力小さく而もHが高いこと並に“弾性的”な材料の代表であること等、特異な物質であるためEとHとの関連性は複雑を極め鋼等と同列にMrを律する定則を打ち建てることは困難と云えよう。尙ゲージ鋼の摩擦特性の優秀性は精選された材質及処理によつて数理的に表し出来ない安定で、且緻密な要素を包含している結果と考えられる。

#### iv) 油類の効果に就いて

次に油の影響に就いては第5表と第6表とを比較して見ると、乾燥状態に比して一樣に増大して居る、即ちゲージ鋼では

乾燥 < 水 < 時計油

の順で、スリ硝子では

乾燥 < 機械油 < 時計油

の順となり、何れも乾燥状態が最少である。これは久田博士の油<sup>(5)</sup>の存在によつて却つて転り摩擦は増大すると云う実験事実に符合するものである。而しスリ硝子の場合機械油 < 時計油の現象は油膜の塗布量が均一性を欠き且同一厚さの油膜を作ることが出来なかつた為と推測される。何れにせよ摩擦面が潤滑液で被われている場合には乾燥状態より摩擦が大きいと云う一般に認められている結果に到達した。

\* 因みに破壊試験を行つた廻 modulus of rupture:  $\sigma_b = 588.8 \text{ kg/cm}^2$  (5回の平均値) であつて、接触部最大応力附近では塑性変形を起していることが明白となつた。

## 7 結 論

以上数種の条件の下に行つた実験結果から得られた転り摩擦に関する推察を纏めると

- 1) 転り摩擦は主として接触面間の変形(歪)によつて起る。
- 2) 一般に転り摩擦モーメントは減速と共に漸増を示し、ついに静止点附近で一義的に上昇し最大値に達する、この傾向は摩擦大なる面程顕著である。
- 3) 球と底面との接触圧が共に弾性域にあれば摩擦モーメントの大きさは主としてヤング率に影響し、塑性域にあれば硬度(Shore)に支配される。
- 4) 油の存在によつて転り摩擦モーメントは増加する。
- 5) 転り摩擦モーメントは微量であるためにこれに関係する因子は甚だ多く、従つて再現性ある実験は往りのそれに比して更に困難である。
- 6) 摩擦の変動は主として座の材料的(所謂弾性的な諸性質)不均一に依存し、面の凹凸はこれを助長する。

以上の推論は上述の実験範囲での結果に基づいたものであつて、今後荷重(P)、回転体の曲率半径(r)及慣性モーメント(I)等を変えて、この結論を更に押進めたい考へである。

終りに臨み本稿を草するに当つて御懇篤なる御教示と御理解とをお寄せ下さつた当学部長工学博士結城朝恭先生に深甚の謝意を表すると共に本実験遂行に努力を払われた昭和28、29年度機械科卒業生坪井茂則、木田武治、滝沢本久諸君の労を多とするものである。

## 参 考 文 献

- 1) 例えばArchie Higdon and William B. Stiles: Engineering Mechanics. Prentice-Hall 1950
- 2) 久田太郎: 機械試験所報告No. 3 195011950/66又は森口繁一: 力学 日本機械学会発行昭24
- 3) 宮入武夫, 北野幾造: 軸受の動摩擦特性第1報信州大学工学部研究報告第1巻, 第2号昭28/3
- 4) R. K. Allan: Rolling Bearings. London. Pitman 1946
- 5) 久田太郎: 前掲

## Summary

# ON THE EXPERIMENTAL STUDY OF ROLLING FRICTION OF BALL IN SLOW MOTION

Takewo MIYAIRI\*

(Institute of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

It is generally known that rolling friction is much smaller than sliding friction. However slight the friction of rolling bearings may be, when such bearings are applied in industrial instruments, the properties in the instruments are important factors in their accuracy, sensibility and performance. This experiment has been made in order to investigate the kinetic frictional moment of a rolling steel ball, to record the movement of the ball along a horizontal V rail from slowmotion to standstill on the film.

Experiments contributed to obtain the mechanism for friction in bearings. The effects of various materials used in the rails, i. e., the elasticity and hardness of the materials and the effect of lubrication have been investigated. Experimental results are roughly summarized as follows :

- 1) When the contact pressure between the ball and the rail are within a elastic limit, the frictions are mainly in fluenced by the Young's Modulus, but when out of its elastic limit, the frictions are mainly effected by the Shore's hardness.
- 2) Oil will surely increase the frictional moment.
- 3) Friction is created, to a large extent, by deformation between contact surfaces caused by pressure.
- 4) In general, frictional moments gradually increase with retardational motion till at last max. value of friction is reached uniquely. The more the friction is, the more distinct is this tendency.
- 5) As the amount of rolling friction is small, the factors of the friction come to be numerous, and so the reproducibility of experiments are more difficult than those of sliding experiments.

---

\* Assistant professor of Shinshu University.