技 術 論 文

金屬接觸面の波状變形について*

田 中 實**

Minoru Tanaka: On the Wavy Deformation of Contact Metal Surfaces : This is a report of the results of measurements of the wavy deformations due to compression of contact plane surfaces of the same kind and the different kinds of metals, such as copper, brass, mild steel, axle steel and gray cast iron, as shown in Table 1. In the present experiments, we used the cylindrical test pieces of 10 millimeters in diameter and 10 millimeters in height, the Amsler 10 ton universal testing machine, the needle trace surface tester ($\times 500$), etc. The results obtained are summarized as follows: (1) In the case of the same kind of metals, the contact surfaces give the wavy deformations due to the compressive stress over a certain limit and the roughness increases by the greater stress intensity, as shown in Table 2. (2) In the case of the different kinds of metals, the contact surfaces give the wavy deformations under the compressive stresses greater than those which produce the plastic deformations of the harder metals and the roughnesses are nearly proportional to the yielding of the harder metals, as shown in Table 3~6. (3) When the gray cast iron contacts with the other metals, the surfaces of the latter make deformations as the prints of the shapes and distributions of flaky graphite in cast iron, as shown in Photo. 11 and Photo. 15.

(Received November 6, 1951)

I. 緒 言

本報告は銅、黄銅、軟鋼、車軸用鋼および灰鑄鐵について同種あるいは異種の金屬をそれぞれ壓縮したときの接觸面の表面状態を測定した結果である。これに関する研究は、眞島正市博士⁽¹⁾がすでに「結晶組織より見たる磨耗の機構について」と題して亜鉛、アルミニウム、錫、銅、黄銅および鐵などの壓縮面の模様を顯微鏡によつて観察し、壓縮模様は金屬の結晶の方向による硬度の相異と結晶粒界の異常性のために壓縮した金屬の各々の金屬組織に應じて生ずると結論しておられる。しかし未だ金屬接觸面の凸凹を數量的に測定したものは見受けられない。

著者はたまたま車軸用鋼のローラー仕上面の研究⁽²⁾と関連して金屬接觸面の状態について二、三の測定を行い、比較的興味ある結果を得たのでここに報告する次第である。

II. 試片および試験方法

試片は直径 10 mm, 高さ 10 mm の圓柱で、電氣銅、6-4 黄銅、軟鋼 (0.1% C)、車軸用鋼 (0.4% C) および鑄鐵 (3.47% C, 2.39% Si の灰鑄鐵) などの 5 種類の試料から多數製作し、焼準したものである。各試片の焼準温度および平均硬度は Table 1 の如くである。各試片は両端面をラシャ仕上し、所要の相手の試片と組合せて、各端面を

相對せしめ壓縮した。壓縮はアームスラー式萬能材料試験機 (容量 10t) を使用し、試験機と試片との間にはグリー

Table 1 Normalizing Temperatures and Hardnesses of Test Pieces.

Test Piece	Normalizing Temperature (°C)	Vickers Hardness
Electrolytic Copper	600	52
6:4 Brass	600	84
Mild Steel (0.1 % C)	850	119
Axle Steel (0.4 % C)	830	193
Gray Cast Iron (3.47 % C, 2.39 % Si)	550	243

スを塗付して行つた。壓縮後試片の接觸面の状態を觸針式仕上面検査機 (日本光學 K. K. 製) と金屬顯微鏡によつて調べた。接觸面の凸凹は仕上面検査機により光學的に 500 倍に擴大されてプロマイド紙に感光する。この凸凹の比較は JES 機械 0601 の表面アラサの決定法⁽³⁾に従つて行い、凸凹を示す波形の寫眞で 3 ケ所以上の波の頂點を通る基準線を作り、この基準線と平行しかつ 3 ケ所以上の波の底點を通る線を畫き、これら平行線の間の距離を $\mu (= 0.001 \text{ mm})$ 單位で表示し、接觸面の粗さと定めた。顯微鏡試験は主として斜方照明によつて行つた。なお壓縮試験の前後に試片の直径をマイクロメーター (精度 $\pm 2\mu$) で測定して試片の變形量の比較をした。

III. 試験結果

** 東京工業大學精密機械研究所

* 1951 年 10 月本會神戸大會に發表

(1) 眞島, 日本機械學會誌論文集, 第 5 卷第 1 部 (1939) p. 97.

(2) 田中, 小林, 「車軸材の硬化特性」1951 年 4 月本會東京大會講演概要, p. 21

(3) 例えば精密機械特集號表面粗さとその測定法 1948 年 10 月精機學會發行.

1. 同種の金属の接界面

銅と銅あるいは黄銅と黄銅の如く同種の金属を壓縮した場合の試片の直径の変化および接界面の粗さは Table 2

Table 2. Results of Compression Tests of Same Kind of Metals.

Test Piece No.		Compressive Stress (kg/mm ²)	Diametrical Deformation of Test Piece (%)	Roughness of Contact Surface (μ)
Copper	Cu 17	13	3.5	2~4
	Cu 18			
	Cu 19	23	9.0	2~5
	Cu 20			
Brass	Br 5	25.4	3.0	0~1
	Br 6			
	Br 7	35	5.7	2
	Br 8			
Mild Steel	114	25	0.8	1
	119			
	14	38	2.6	2~3
	15			
	16	48	5.0	8~14
	17			
	11	61	11.7	20
	12			
Axle Steel	44	43	0	0
	45			
	410	51	1.2	0~1
	411			
	41	60	1.7	0~1
	42			
Cast Iron	C3	26	0	0
	C4			
	C2	39	0	0
	C6			
	C1	52	0.3	0(~1)
	C5

Photo. 1 Results of the Surface Tester of Copper Surfaces Compressed with Copper. Compressive Stress: 13 kg/mm² for No. Cu 17, 23 kg/mm² for No. Cu 19

Photo. 3 Results of the Surface Tester of Mild Steel Surfaces Compressed with Mild Steel. Compressive Stress: 38 kg/mm² for No. 15, 48 kg/mm² for No. 16, 51 kg/mm² for No. 11.

Photo. 2 $\times 200(\times 7/12)$
No. Cu 19: Copper with
Copper (23 kg/mm²)

Photo. 4 $\times 200(\times 7/12)$
No. 15: Mild Steel with
Mild Steel (38 kg/mm²)

Photo. 5 $\times 200(\times 7/12)$
No. 16: Mild Steel with
Mild Steel (48 kg/mm²)

Photo. 6 $\times 200(\times 7/12)$
No. 11: Mild Steel with
Mild Steel (51 kg/mm²)

Photo. 7

Photo. 7 Results of the Surface Tester of Copper Test Pieces as shown Table 3.

の如くである。Photo. 1は銅を13kg/mm²(試片Cu17)および23kg/mm²(試片Cu19)の應力で壓縮した場合の仕上面検査機の結果で、Photo. 2は試片Cu19の表面状態を示し、Photo. 3~6は軟銅を38kg/mm², 48kg/mm²および61kg/mm²の應力で壓縮した場合の仕上面検査機の結果と表面状態である。すなわち同種の金属の接界面は一定の値以上の壓縮應力をうけると凸凹を生じ、多数の滑り線が発生する。そしてその凸凹は應力の増大するとともに著しくなる。接界面の凸凹は硬質の金属程高い壓縮應力によつて生じ、同一應力の下では硬質金属程小さいことが認

められる。

2. 異種金属の接觸面:(1) 銅

Table 3 は銅に黄銅, 軟鋼, 車軸用鋼 および 鑄鐵を
Table 3 Results of Compression Tests of
Copper and Other Metals.

Test Piece No.	Compressive Stress (kg/mm ²)	Diametrical De- formation of Test Piece (%)		Roughness of Contact Surface (μ)
		Copper	Other Metal	
With Brass	Cu 9 Br 9	12.5	1.7	0.2
	Cu15 Br 17	27	11.0	4.5
				2~3
With Mild steel	Cu14 123	27	10.0	1.0
				2
With Axle Steel	Cu13 4.6	27	10.0	0.1
				0
With Cast Iron	Cu21 C14	27	10.3	0
				0~1

分が刻印された状態になる。

(2) 黄 銅

Table 4. Results of Compression Tests
of Brass and Other Metals.

Test Piece No.	Compressive Stress (kg/mm ²)	Diametrical De- formation of Test Piece (%)		Roughness of Contact Surface(μ)
		Brass	Other Metal	
With Mild Steel	Br14 120	25.4	4.2	0.9
	Br15 121	40	8.2	3.5
With Axle Steel	Br11 413	25.4	3.8	0.5
	Br12 414	40	9.0	0.4
With Cast Iron	Br18 C 12	25.4	4.5	0
	Br19 C 13	40	7.7	0

Photo. 8 $\times 20(\times 7/12)$
No. Cu 9: Copper with
Brass (12.5 kg/mm²)

Photo. 9 $\times 200(\times 7/12)$
No. Cu 14: Copper with
Mild Steel (27 kg/mm²)

Photo. 10 $\times 200(\times 7/12)$
No. Cu 13: Copper with
Axle Steel (27 kg/mm²)

Photo. 11 $\times 200(\times 7/12)$
No. Cu 21: Copper with
Cast Iron (27 kg/mm²)

壓縮した場合の結果で、各組合せによる銅試片の接觸面の凸凹は Photo. 7 の如くであり、その際の表面状態は Photo. 8~11 に示されている。すなわち銅を黄銅と組合せて 12.5kg/mm² の應力で壓縮するも、兩者の接觸面には何等凸凹はなく、27 kg/mm² の應力によつて 2~3 μ の凸凹が発生する。しかし同じく 27kg/mm² の壓縮應力でも銅が車軸用鋼と組合せられた場合には凸凹はなく、鑄鐵との場合には極めて僅少の凸凹が生ずるのみである。鑄鐵と接觸した銅の表面は、Photo. 11 の如く鑄鐵の黒鉛の部

黄銅に軟鋼, 車軸用鋼および鑄鐵を壓縮した場合の結果は Table 4 の如くである。黄銅は軟鋼と組合せた場合には 40 kg/mm² 程度の壓縮應力によつて 2~3 μ の凸凹が接觸面に生ずるが、同じ應力の下に車軸用鋼あるいは鑄鐵と組合せれば、軟鋼との場合に比してはるかに平坦な接觸面になる。鑄鐵との組合せで壓縮應力 25 kg/mm² および 40 kg/mm² の場合は黄銅面の粗さは同程度であるが、後者には黒鉛の部分が刻印せられており、前者はほとんど平坦面である。

(3) 軟 鋼

Table 5 は軟鋼に車軸用鋼と鑄鐵とを組合せた場合の結果である。また Photo. 12 は軟鋼を兩金屬に壓縮した際の接觸面の凸凹を示し、Photo. 13~15 はそのときの軟鋼表面の顯微鏡寫眞である。軟鋼は軟鋼同志の壓縮では 40 kg/mm² 以上の應力でその接觸面は Photo. 5~6 の如く著しく流動して激しい凸凹を有するものとなるが、車軸用鋼あるいは鑄鐵と組合せれば 50~60kg/mm² 程度の壓縮應力をうけても比較的平坦な接觸面となる。Photo. 3 の No. 11 試片と Photo. 12 の No. 113 試片とを比べれば著しい相異が認められる。車軸用鋼との接觸面は微細な皺模様とこれを圍む大きな皺とが生じ、鑄鐵との接觸面は黒

鉛の形状が刻印されている。車軸用鋼との接触面の皺模様は眞島博士の實驗結果から推定すると双方の鋼の結晶粒の形状に起因するものと思われる。

Table 5 Results of Compression Tests of Mild Steel and Other Metals.

Test Piece No.	Compressive Stress (kg/mm ²)	Diametrical Deformation of Test Piece (%)		Roughness of Contact Surface (μ)
		Mild Steel	Other Metal	
With Axle Steel	13/43	51.5	8.0	1.0
	113/412	61	11.7	2.1
				2~3
With Cast Iron	126/C10	38	3.5	0.1
	126/C11	51	7.5	0.3
				1~2

13

12

126

Photo. 12

Photo. 12 Results of the Surface Tester of Mild Steel Test Pieces as shown Table 5.

Photo. 13 $\times 200(\times 7/12)$
No. 13: Mild Steel with Axle Steel (51.5 kg/mm²)

Photo. 14 $\times 200(\times 7/12)$
No. 113: Mild Steel with Axle Steel (61 kg/mm²)

Photo. 15 $\times 200(\times 7/12)$
No. 126: Mild Steel with Cast Iron (51 kg/mm²)

(4) 車軸用鋼

車軸用鋼と鑄鐵との試験結果はTable 6の如くで 50 kg/mm² 程度の壓縮應力により車軸用鋼の表面に鑄鐵の黒鉛

Table 6 Results of Compression Tests of Axle Steel and Cast Iron.

Test Piece No.	Compressive Stress (kg/mm ²)	Diametrical Deformation of Test Piece (%)		Roughness of Contact Surface (μ)
		Axle Steel	Cast Iron	
417/C7	38	0.4	0	0
418/C8	51	1.0	0.2	1

部分が僅かに刻印せられる。

(5) 試片の變形量と壓縮應力の関係

試片の變形量は壓縮前後の試片の直径の變化量によつて算出した。Fig. 1 は前述の各試験における各試片の變形

量と壓縮應力との關係を圖示したものである。すなわち各試片の變形量はその組合せが同種の金屬あるいは異種の金

Fig. 1 Relationship between Compressive Stresses and Diametrical Deformations of Test Pieces.

屬の如何にかゝらず壓縮應力の増加とともに増大する。

銅は銅と組合せて壓縮した場合 13 kg/mm² の應力で 3.5%, 23 kg/mm² の應力で 9% の變形をなし、銅と他の試料とを 27 kg/mm² の應力で壓縮すれば、銅は何れの

組合せでも 10~11% の變形を生じ、黄銅は 4.5%, 軟銅は 1%, 車軸用鋼、鑄鐵は 0% の變形となる。これらの測定値はかなり分散しているが、各試料について曲線を描くと大體拋物線状になり、各曲線を變形量 0 に延長すると各試料の降伏點には一致する。

IV. 試験結果の考察

以上の試験結果により同種の金屬を壓縮する場合には、Table 2 の如く、接觸面の凸凹はある一定値以上の應力によつて發生し、この應力値は Fig. 1 における各曲線の試片の變形量を 0 にする壓縮應力値に相當するものと認められる。すなわち車軸用鋼、鑄鐵において 43 kg/mm², 39 kg/mm² なる應力は何れも試片が彈性變形のみをなす範囲にあるものと考えられ、その際には接觸面に凸凹の發生はない。接觸面の凸凹は試片が塑性變形を開始するにおよんで生じ、塑性變形の進行とともに増大する傾向がある。

異種金屬を壓縮する場合には、銅および黄銅などの軟質金屬は軟鋼、車軸用鋼、鑄鐵などの硬質金屬と組合せれば、軟質金屬同志のときよりも高い壓縮應力によつて接觸面に凸凹が発生する。そして接觸面の凸凹は壓縮應力が同一ならば、相手の金屬が硬質であるほど小さく、壓縮應力が變化すれば、硬質金屬の變形量にほぼ比例して變化する。實際に 27 kg/mm^2 の壓縮應力で銅に黄銅を組合せたときの接觸面の凸凹は $2 \sim 3 \mu$ となり、軟鋼を組合せたときは 2μ 、車軸用鋼との場合はほとんど平坦となる。そしてこのときの車軸用鋼の變形量は 0 である。従つて異種金屬の壓縮の場合は、一方の金屬が塑性變形をしても他方の金屬が弾性變形のみであれば接觸面に凸凹はなく、双方の金屬が塑性變形をすると接觸面に凸凹が発生することが認められる。

鑄鐵と接觸する異種金屬の壓縮面には鑄鐵の片狀黒鉛の部分に刻印された如き状態を呈することは注目すべき現象と思われる。鑄鐵は磨耗現象に關係深き部分に用いられ、特に相手の金屬は鑄鐵と異なる場合が多い。鑄鐵の黒鉛部に異種金屬表面の一部が凸入しておれば、これら 2 種の金屬が相對的に運動する場合には凸出部の破壊と黒鉛の脱落がおこるものと考えられ、前者は磨耗量を増大せしめる作用をなし、後者は黒鉛に潤滑劑の如き作用を與える。

鑄鐵がフェライトに圍まれた片狀黒鉛とパーライトよりなる場合に、相手の金屬がその金屬組織の中にフェライトと同程度あるいはより軟質のものを含有すれば極めて低い壓縮應力によつてフェライトの部分に著しい凸凹を生ずることになる。従つて鑄鐵は微細な渦狀黒鉛を一樣に分布せしめると同時にフェライトの析出を可及的に減少せしめた場合に耐磨耗性の向上が期待される。

最近急速に發展した球狀黒鉛とパーライトよりなる球狀黒鉛鑄鐵においても耐磨耗性を考慮する場合にはフェライトの析出を極力防止すべきである。實際に東京都工業獎勵

館の小川喜代一博士の實驗結果⁽⁴⁾によつても同様の傾向が認められている。

また球狀黒鉛とフェライトよりなるダクタイル鑄鐵は、フェライトが多くの場合シリコフェライトであり、普通のフェライトよりかなり硬質であるため従来の黒心可鍛鑄鐵に比し耐磨耗性は向上しているものと考えられる。

磨耗現象は僅かな實驗結果から輕々しく論ずることは慎むべきであるが、磨耗が主として機械的破壊によつて生ずる場合には金屬接觸面の表面状態から磨耗に關する一半の様相を覗い得るものと思われる。

V. 結 語

銅、黄銅、軟鋼、車軸用鋼および灰鑄鐵について同種あるいは異種金屬の壓縮接觸面を觸針式仕上面検査機および金屬顯微鏡によつて試験した結果を總括すれば次の如くである。

(1) 同種の金屬を壓縮する場合には、接觸面はある一定値以上の應力によつて凸凹を生じ、その凸凹の量は壓縮應力の増大するとともに増加し、金屬の變形量にほぼ比例する。

(2) 異種の金屬を壓縮する場合には、接觸面は双方の金屬が塑性變形を開始するにおよんで凸凹を生じ、その凸凹量は硬質金屬の變形量にほぼ比例する。

(3) 銅、黄銅、軟鋼、車軸用鋼に片狀黒鉛を有する鑄鐵を壓縮變形せしめると、これらの金屬の接觸面には片狀黒鉛の形狀が刻印される。これは鑄鐵の耐磨耗性を考慮する際に黒鉛の形狀および鑄鐵の組織に對し重要な示唆を與えるものと考えられる。

この研究は東京工業大學精密機械研究所において、所長佐々木重雄教授、山田良之助教授、横山均次教授の御指導によつて行われ、鑄鐵試料は岡本正三教授にいただいたものである。こゝに諸先生に厚く敬謝の意を表すると同時に熱心に實驗を協力された小林五郎氏に深く感謝するものである。またこの研究は文部省科學研究費によつて行われたことを附記し謝意を表する次第である。

(4) 小川、「粒狀黒鉛鑄鐵の磨耗に關する研究」1951 年 4 月本會東京大會講演概要、p. 31、および 1951 年 10 月同概要 p. 82。