微小硬さの荷重依存に及ぼす表面粗さの影響†

香 川 勝 一*

Influence of Surface Roughness on Load Dependence of Microhardness

by

Masakazu KAGAWA*

In order to investigate the influence of surface roughness on load dependence of microhardness of annealed structural rolled steel and carbon steel, hardness tests were made by changing the grade of surface roughness as a parameter. The results obtained were analyzed by means of the analysis of variance.

The main results obtained were as follows;

(1) Load dependence existed between the indentation load and the microhardness number above the specified value of hardness. The range of the indentation load showing load dependence was influenced by the surface roughness.

(2) A logarithmic linear relationship existed between the indentation load and the microhardness number. Load dependence curves varied depending upon the surface roughness.

キー・ワード：微小硬さ，荷重依存，表面粗さ，統計的方法

1 緒 言

現在までに、微小硬さの荷重依存については多くの研究が行われており、荷重依存の存在が認められるとする研究には Tate, Schultze, 吉野, Bergsman 等によるものがある。これらの研究では、庄こんの弾性回復がその主な原因であるとしている。一方吉沢・中村, Vitovec, Taravov・Thibault, 明石・真下, Cambell 等は、微小硬さにおいても相似則が成立し、試料が均質で表面加工硬化層がなければ、荷重依存は存在しないとしている。

以上述べたように、微小硬さの荷重依存については両説があるが、実用材料の荷重依存に及ぼす表面粗さの影響については、限定した表面粗さ条件について実施しているのが現状であり、系統的に表面粗さを変化させたときの両者の関係については報告されていない。そこで本実験では、実用材料の荷重依存に及ぼす表面

粗さの影響を明らかにするために、2種類の鋼について表面粗さを変化させて実験を行った。また、統計的手法を用いた実験計画および解析を行って、両者の関

Table I. Chemical composition (%).

Materials	C	Mn	P	S
SS 34	0.081	0.14	0.023	0.021

Materials	C	Si	Mn	P	S
S55C	0.55	0.19	0.76	0.021	0.012

Table II. Mechanical properties.

Materials	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SS 34	23.8 (233 MPa)	36.7 (360 MPa)	28.6
S55C	45.1 (442 MPa)	80.1 (786 MPa)	15.2

Table III. Final emery paper and surface roughness.

Emery paper (#)	Final emery paper (#)	Surface roughness (μmRmax)	
		SS34	S55C
100, 120	120	2.80	2.60
100, 120, 180, 320	320	0.60	0.59
100, 120, 180, 320, 400, 500	500	0.49	0.42
100, 120, 180, 320, 400, 500, 600, 800	800	0.27	0.25
100, 120, 180, 320, 400, 500, 600, 700, 800, 1000	1000	0.20	0.18
100, 120, 180, 320, 400, 500, 600, 700, 800, 1000, 2000, 3000	3000	0.17	0.15

† 原稿受理 昭和61年3月3日 Received Mar. 3, 1986

* 正会員 東海大学工学部 平塚市北金目, Faculty of Engineering, Tokai University, Kitakaname, Hiratsuka

係について定量的な評価を行った。

2 実験方法

試料は SS34 および S55C の 2 種類の鋼を用い、両試料の板厚は 3.2 mm および 6 mm とし、外形寸法はいずれも 30×100 mm とした。試料の化学成分および機械的性質を Table I および Table II に示した。Table III には研磨手順および各最終研磨での表面粗さを示した。なお表に示したように、試料により表面粗さが相違するので、以下においては表面粗さを最終研磨によって表すことにした。また試験片は加工、研磨等による影響を取り除くために、真空炉中で 600℃、1 時間保持の後炉中冷却の熱処理を施した。

硬さ試験機は明石製の微小硬さ試験機を用い、アンビルはプレーンアンビルとし、圧子は対面角 136° のダイヤモンド四角すい圧子とした。硬さ測定に際しては、圧こん相互間の距離を圧こん対角線長さの 4 倍以上とし、研磨の方向と圧こんの対角線方向とを一致させて行った。また硬さ試験における荷重保持時間は 30 sec とし、荷重負荷速度は 0.03 mm/sec とした。

試験条件は、両試料ともに Table IV に示すように硬さ試験荷重を 10 gf から 1000 gf までの 8 段階とし、最終研磨は 6 段階とした。試験片枚数は各最終研磨ごとに 3 枚とし、1 枚当りの測定点数は各硬さ試験荷重に対して 6 点とした。

Table IV. Measuring conditions.

Finalemergy paper (#)	Specimen (A ₁ ~A ₃)	Indentation load (gf)	Measuring-points per one indentation load (B ₁ ~B ₆)
120	3	10-C ₁	6
320	3	25-C ₂	6
500	3	50-C ₃	6
800	3	100-C ₄	6
1000	3	300-C ₅	6
3000	3	500-C ₇	6
		1000-C ₈	6

Measuring points per one specimen

3 実験計画

荷重依存に及ぼす表面粗さの影響を定量的に評価するために、Table IV に示したように A, B および C の各因子を A は試験片, B は横方向の測定位置, C は硬さ試験荷重として割りつけた。各因子の水準数は A, B および C に対して、それぞれ 3, 6 および 8 とした。実験値については、3 元配置繰返しなしの分散

分析を行い、F 検定および t 検定による評価を行った。なお実験順序については、乱数表を用いてランダム化を行って決定した。

4 実験結果および考察

4.1 荷重依存の存在

Fig. 1 および Fig. 2 は、SS34 および S55C の各最終研磨での硬さ試験荷重と微小硬さの関係を図示したものである。図より、いずれの最終研磨においても、硬さ試験荷重が大きくなると硬さ数が減少し、荷重依存の存在することが示されている。

Fig. 1. Relationship between indentation load and average of hardness number (SS34).

Fig. 2. Relationship between indentation load and average of hardness number (S55C).

Table V および Table VI は、統計的に荷重依存が存在するか否かを評価するために、各最終研磨ごとに分散分析を行い、各効果の不偏分散 V と不偏分散比 F_0 についてまとめたものである。表中の S. V. は要因であり、A, B および C は各因子の主効果を表し、 $A \times B$, $B \times C$ および $C \times A$ は交互作用効果を表す。また e は実験の場における誤差である。なお F 検定の

Table V. Mean square V and mean square ratio F_0 (SS34).

S. V.	#120		#320		#500		#800		#1000		#3000	
	V	F_0	V	F_0	V	F_0	V	F_0	V	F_0	V	F_0
A	560.0	2.516	115.7	1.049	224.2	3.015	157.0	2.326	2.425	0.04388	113.1	2.253
B	217.6	0.9775	71.54	0.6486	75.42	1.014	17.17	0.2544	72.32	1.308	56.60	1.127
C	6304	28.32**	6657	60.35**	5863	78.84**	3954	58.59**	4427	80.10**	3277	65.28**
A $\times$ B	518.9	2.331*	44.50	0.4034	30.43	0.4092	43.72	0.6478	71.91	1.301	18.71	0.3737
B $\times$ C	170.5	0.7659	137.4	1.246	115.9	1.558	45.40	0.6647	33.86	0.6126	33.71	0.6715
C $\times$ A	770.7	3.462**	102.6	0.9299	72.94	0.9808	61.64	0.9133	42.21	0.7637	48.82	0.8131
e	222.6	—	110.3	—	74.37	—	67.49	—	55.27	—	50.20	—

Table VI. Mean square V and mean square ratio F_0 (S55C).

S. V.	#120		#320		#500		#800		#1000		#3000	
	V	F_0	V	F_0	V	F_0	V	F_0	V	F_0	V	F_0
A	1686	1.942	19.40	0.07782	322.4	1.305	24.49	0.1260	83.35	0.7875	68.20	0.7545
B	1346	1.550	144.2	0.5784	507.8	2.055	319.4	1.643	28.34	0.2671	104.0	1.151
C	3429	3.949**	2663	10.68**	2791	11.30**	2119	10.90**	1586	14.95**	642.4	7.107**
A $\times$ B	788.3	0.9079	181.0	0.7260	382.3	1.547	253.2	1.302	98.82	0.9314	51.19	0.5663
B $\times$ C	1270	1.463	382.3	1.533	200.0	0.8094	145.2	0.7469	107.8	1.016	58.83	0.6508
C $\times$ A	1783	2.053*	262.5	1.053	309.7	1.253	231.4	1.190	190.1	1.792	129.9	1.437
e	868.3	—	249.3	—	247.1	—	194.4	—	106.1	—	90.39	—

Fig. 3. Polished surface and indentation (SS34).

Fig. 4. Polished surface and indentation (S 55 C).

結果, F_0 値に 5% の危険率で有意差が生じた場合には * 印を付記し, 5% および 1% の危険率で有意差が生じた場合には ** 印を付記した. 表より, いずれの最終研摩においても主効果 C に有意差が生じ, 統計的にも荷重依存の存在することが示されている. しかし, SS34 の #120 では $A \times B$ および $C \times A$ で, また S55C の #120 では $C \times A$ で有意差が認められており, #120 の最終研摩では硬さ試験荷重の主効果以外の効果の影響を受けることが示されている.

Fig. 3 および Fig. 4 は, 研摩による表面状態と圧こんの関係を示したものであり, 倍率はいずれも 210 倍である. 図より最終研摩程度が低い場合は, いずれの硬さ試験荷重においても圧こんが不完全となることが示されている. また最終研摩程度が良くなると, 明りょうな圧こんが得られることも示されている. さらに, #3000 のときの結晶組織と圧こんの関係を示すと Fig. 5 のようになる. ここでの倍率も 210 倍である. ここでも硬さ試験荷重が小さい場合には, 結晶粒子に比較して圧こんが小さくなり, 得られる硬さ数に影響を及ぼすことが示されている. なお, 圧こんは両試料ともに硬さ試験荷重を 100 gf 以上とすれば結晶粒子の影響をほとんど受けなくなると考えられ, 本実験の試料の範囲では, 結晶粒子の圧こんに及ぼす影響に試

料による相違はないと思われる. これらより最終研摩程度が低い場合には, Fig. 1 および Fig. 2 に示したように, 硬さ試験荷重の小さい範囲での硬さ数の平均値に一貫性がなくなり, 統計的に硬さ試験荷重の効果のみによる荷重依存を見ることができなくなるものと考えられる.

以上より微小硬さの荷重依存は, 統計的には表面粗さを SS34 では $0.60 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ 以下とし, S55C では $0.59 \mu\text{m} R_{\text{max}}$ 以下としなければ硬さ試験荷重以外の効果の影響を受けることが示された.

4・2 荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲

4・1節で主効果 C においてのみ有意差が認められた最終研摩について, 荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲を見出すために t 検定を行った. t 分布の 5% 危険率で求めた平均値の差の区間推定値を Fig. 1 および Fig. 2 の図中に示した. ここでの検定は, 微小硬さの 1000 gf あるいはビッカース硬さの 1 kgf ^{811D} 以上の硬さ試験荷重では, 硬さ数が一定となるので 1000 gf の平均値を基準として t 検定を行った.

Fig. 1 の #320 では区間推定値が 6.925 であり, 1000 gf の平均値が 135.9 であるので, 300 gf のときの平均値 143.6 とは有意差が存在する. よって, 荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲は 500 gf 以下 (微小硬さ

Fig. 5. Microstructure and indentation.

数 $MH_V=140.8$ 以上) となる。他の最終研摩および S55C についても同様に検定を行い、荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲に相当する各最終研摩の記号に矢印を付記して示した。Fig.1 および Fig.2 に示したように、最終研摩すなわち表面粗さが良くなると、荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲は小さくなる傾向にある。SS34 では表面粗さが $0.27\mu\text{mRmax}(\#800)$ 以上では 500gf 以下 ($MH_V=140.4$ 以上) の硬さ試験荷重範囲で荷重依存が存在し、 $0.20\mu\text{mRmax}(\#1000)$ 以下では 300gf 以下 ($MH_V=140.2$ 以上) で存在する。また S55C では $0.18\mu\text{mRmax}(\#1000)$ 以上では 300gf 以下 ($MH_V=240.0$ 以上) で荷重依存が存在し、 $0.15\mu\text{mRmax}(\#3000)$ 以下では 200gf 以下 ($MH_V=236.1$ 以上) で存在する。

4.3 各硬さ試験荷重での表面粗さの影響

Fig.6 および Fig.7 は、各硬さ試験荷重での表面粗さと硬さ数の平均値の関係を示したものである。図より、各硬さ試験荷重ともに表面粗さが良くなると、硬さ数の平均値は減少する傾向にある。また硬さ試験

Fig. 6. Relationship between surface roughness and average of hardness number (SS34).

Fig. 7. Relationship between surface roughness and average of hardness number (S55C)

荷重が大きくなると、ばらつきの小さい平均値が得られることが示されている。

表面粗さの影響を見るために、4.2節と同様に t 分布の5%危険率で求めた平均値の差の区間推定値を図中に示した。ここで、Fig.6の10gfについて $\#3000$ のときの平均値を基準として t 検定を行うと、 $0.27\mu\text{mRmax}$ 以下の表面粗さで一定の平均値となることが示されている。同様の検定を各硬さ試験荷重について行い、一定の平均値が得られる表面粗さに相当する各硬さ試験荷重の記号に矢印を付記して示した。4.2節で示したような明確な傾向は示さないが、硬さ試験荷重を大きくすれば、表面粗さの大きい値で一定の平均値が得られる傾向にある。また、図より全硬さ試験荷重に共通した表面粗さの影響を見ると、SS34では $0.20\mu\text{mRmax}$ を境界とし、S55Cでは $0.18\mu\text{mRmax}$ を境界としてその影響が変化することが示されている。

4.4 荷重依存曲線について

前節までにおいて、微小硬さには荷重依存が存在し、荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲は、表面硬さによって影響されることが示されている。そこで荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲で、硬さ試験荷重と硬

さ数間に両対数の直線関係が存在するという仮定のもとで回帰分析を行った。その結果求めた F_0 値を Table VII に示した。表に示したように、いずれの最終研磨においても $F_{124}^1(0.05)=3.917$ および $F_{124}^1(0.01)=6.844$ より F_0 値は大きく、有意差が認められ、両者の間には両対数の直線関係の存在することが示された。よって、回帰直線を求め図示すると、Fig. 8 および Fig. 9 のようになる。図は横軸を硬さ試験荷重 P の対数とし、縦軸を硬さ数 MHV の対数としている。

また図の回帰直線は 4・3 節で示したように、SS34 および S55C とともに #1000 の最終研磨での表面粗さ

Table VII. Mean square ratio F_0 of regression analysis.

	#320	#500	#800	#1000	#3000
SS 34	358.3	328.8	210.2	414.5	278.8
S55C	24.07	26.83	26.40	45.12	10.92

Fig. 8. Relationship between $\log P$ and $\log MHV$ (SS 34).

Fig. 9. Relationship between $\log P$ and $\log MHV$ (S 55 C).

を境界として、表面粗さの影響が相違することが示されている。よって、最終研磨 #1000 以上と以下で区別して荷重依存曲線を用いることも可能であると考えられる。例として SS34 の $0.20\mu\text{mRmax}$ 以上と以下のそれぞれにおいて直線関係が存在するか否かについて検定を行うと、表面粗さが $0.20\mu\text{mRmax}$ 以上では #320, #500 および #800 をこみにして回帰分析を行った結果 $F_0=829.3 > F_{376}^1(0.05)=3.866$ および $F_{376}^1(0.01)=6.704$ となった。また $0.20\mu\text{mRmax}$ 以下では、#1000 および #3000 をこみにして回帰分析を行った結果 $F_0=630.2 > F_{214}^1(0.05)=3.885$ および $F_{214}^1(0.01)=6.756$ となり、いずれの場合も直線関係の存在することが示された。そこで、これらの回帰直線式および信頼区間を求めると、表面粗さ $0.60\sim 0.20\mu\text{mRmax}$ の範囲では、

$$Y = 2.333 - 0.07144 \cdot X \pm 1.966$$

$$\times \left\{ \left\{ \frac{1}{378} + \frac{(X-1.939)^2}{121.0} \right\} \times 7.447 \times 10^{-4} \right\}^{1/2}$$

(ただし、 X は 1.000~2.699 の範囲とする)

となり、表面粗さ $0.20\sim 0.17\mu\text{mRmax}$ の範囲では、

$$Y = 2.324 - 0.07328 \cdot X \pm 1.971$$

$$\times \left\{ \left\{ \frac{1}{216} + \frac{(X-1.813)^2}{56.17} \right\} \times 4.786 \times 10^{-4} \right\}^{1/2}$$

(ただし、 X は 1.000~2.477 の範囲とする)

となった。ここに X は硬さ試験荷重の対数であり、 Y は微小硬さ数の対数である。

5 結 論

実用材料の微小硬さの荷重依存に及ぼす表面粗さの影響を明らかにするために、2種類の鋼について表面粗さを変化させ、統計的手法を用いた実験計画および解析を行って評価をした結果、以下の事柄が明らかとなった。

(1) 微小硬さには荷重依存が存在し、表面粗さを SS34 では $0.60\mu\text{mRmax}$ 以下とし、S55C では $0.59\mu\text{mRmax}$ 以下とすれば、統計的に硬さ試験荷重の効果のみによる荷重依存を見ることができる。

(2) 荷重依存の存在する硬さ試験荷重範囲は、表面粗さが良くなると小さくなる傾向があり、SS34 では表面粗さが $0.27\mu\text{mRmax}$ 以上では 500 gf 以下 ($MHV=140.4$ 以上) の硬さ試験荷重範囲で荷重依存が存在し、 $0.20\mu\text{mRmax}$ 以下では 300 gf 以下 ($MHV=140.2$ 以上) で存在する。また S55C では、 $0.18\mu\text{mRmax}$ 以上においては 300 gf 以下 ($MHV=240.0$ 以上) で荷重依存が存在し、 $0.15\mu\text{mRmax}$ 以下では 200 gf 以下 ($MHV=236.1$ 以上) で存在する。

(3) 荷重依存曲線には両対数の直線関係が存在し、SS34 では表面粗さ $0.20\mu\text{mRmax}$ を境界とし、S55C では $0.18\mu\text{mRmax}$ を境界として荷重依存曲線を区別

して用いることができる。

本研究にあたり、多くのご助言をいただいた東海大学の松原清教授に感謝の意を表します。また試料の熱処理および成分分析にあたっては、(株)吉野工業所神奈川技術研究所の西川正徳氏および高宮昭夫氏に多大なるご助力をいただきここに感謝の意を表します。

(昭和59年5月28日 日本材料学会第33期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) D. R. Tate, Trans. Am. Soc. Metals., **35**, 374 (1945).
- 2) R. Schultze, Microtechnic, **8**, 13 (1954).
- 3) 吉野利男, 硬さ研究会, **37**, 269 (1962).
- 4) 吉野利男, 日本機械学会論文集, **30**, 1113 (1964).
- 5) 吉野利男, 日本機械学会論文集, **32**, 1311 (1966).
- 6) E. B. Bergsman, ASTM Bulletin, **176**, 37 (1951).
- 7) 吉沢武男, 中村嘉良, 硬さ研究会, **19**, 58 (1953).
- 8) F. H. Vitovec, WADC Technical Report, **56**, 282 (1956).
- 9) L. P. Taravov and N. W. Thibault, Trans. Am. Soc. Metals, **38**, 331 (1947).
- 10) 明石和彦, 真下美佐男, 硬さ研究会, **33**, 99 (1954).
- 11) R. F. Cambell 他2名, Trans. Am. Soc. Metals., **40**, 954 (1948).
- 12) 真壁 肇, “品質管理”, 第7, 9章 (1974) 朝倉書店.
- 13) 近藤良夫, 舟阪 渡, “技術者のための統計的方法”, 第4, 7章 (1977) 共立出版.
- 14) 森口繁一, “品質管理講座, 新編統計的方法”, 第6, 8, 9章 (1977) 日本規格協会.
- 15) 新版品質管理便覧編集委員会編, “新版品質管理便覧”, 第3章 (1979) 日本規格協会.

書 評

“超電導とその応用”

田 中 靖 三 (著)

(1986年, 産業図書(株)発行, B 6 判, 202ページ, 1500円)

超電導の科学と技術について基礎的な事柄から応用まで一通りのことが記述されている。また、超電導現象の発見から現在に至る発展の過程、現在の先端技術としての位置づけおよび将来性についても言及されている。

超電導現象そのものについては第2章と第3章の一部で解説されている。超電導を少ない紙数でわかりやすく説明することは元来むずかしいことかも知れないが、この部分はやや曖昧なところが多い。この章はむしろ大体の雰囲気を感じて読み過ごすのが良いかも知れない。

第3章において超電導材料について、かなり詳しく述べられている。色々な見地から材料を分類し、特徴が記述されている。また、実用超電導線材についての製造方法およびその特性について適切な解説がなされている。

第4章から第9章までは、将来性も含めて、超電導の応用について述べられている。基礎科学、エネルギー、輸送、医療・生体科学、エレクトロニクス等の分野で、超電導がいかに利用されているかということが、なぜその分野が超電導を必要とするかという点と併せて、最新のところまで詳しく解説されている。

企業の現場にいる人にとってはもちろん、超電導の基礎研究に従事している研究者・学生にとっても、超電導技術の全般を概観するのに有益な本と言える。また、超電導の関係する現代の先端技術についての読物としてもおもしろい。著者の思想も盛りこまれた力作と言えよう。ただ、誤植とか、表現がややスムーズでないところがいくぶん目につく。改版の時はさらに推敲が加えられることが期待される。

(大阪大学基礎工学部 小田祺景)